

# 丹江口库区 2010—2020 年土壤保持功能 时空特征及其影响因素

廖雯<sup>1</sup>, 胡砚霞<sup>1,2</sup>, 于兴修<sup>1,2</sup>, 刘璇璇<sup>1</sup>

(1.湖北大学 区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062;

2.湖北省农业遥感应工程应用工程技术研究中心, 湖北 武汉 430062)

**摘要:** [目的] 评估丹江口流域土壤保持功能时空变化及其影响因素, 为南水北调中线工程水源地水土流失治理模式的确立以及流域水土保持与生态系统安全管理提供科学依据。[方法] 采用 InVEST 模型和地理探测器方法分别对丹江口库区 2010, 2015 和 2020 年土壤保持功能时空变化特征及其影响因素进行定量分析。[结果] ①丹江口库区 2010—2020 年实际土壤侵蚀量呈递减趋势, 土壤侵蚀等级逐渐向微度侵蚀转变, 且各年间空间分布趋势基本一致。②丹江口库区 2010, 2015 和 2020 年土壤保持量分别为  $6.25 \times 10^9$  t,  $6.62 \times 10^9$  t 和  $7.12 \times 10^9$  t, 呈逐步上升的趋势, 表明库区土壤保持功能不断增强。③不同海拔范围土壤保持功能具有差异, 较高海拔地区土壤保持量较高(如东北部伏牛山、西部秦岭、西南部武当山), 低海拔区土壤保持量较低(如丹江口水库周边地区)。不同土地利用类型土壤保持能力亦差异较大, 以林地最高, 其次为灌草地、园地和耕地。④地理探测器分析结果显示, 丹江口库区土壤保持功能变化主要受地形因子的影响。[结论] 近年来丹江口库区土壤保持功能总体趋势持续好转, 部分区域土壤保持量仍较低, 未来应继续推进退耕还林(草)工程建设, 重视和保护土壤保持能力较强的林地和灌草地, 从而增强库区土壤保持功能。

**关键词:** InVEST 模型; 丹江口库区; 土壤保持功能; 影响因素; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0288-07

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 廖雯, 胡砚霞, 于兴修, 等. 丹江口库区 2010—2020 年土壤保持功能时空特征及其影响因素 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 288-294. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.037; Liao Wen, Hu Yanxia, Yu Xingxiu, et al. Spatiotemporal variation and influence factors of soil conservation function in Danjiangkou Reservoir Area during 2010—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 288-294.

## Spatiotemporal Variation and Influence Factors of Soil Conservation Function in Danjiangkou Reservoir Area During 2010—2020

Liao Wen<sup>1</sup>, Hu Yanxia<sup>1,2</sup>, Yu Xingxiu<sup>1,2</sup>, Liu Xuanxuan<sup>1</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response,

Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China; 2. Hubei Provincial Research Centre for

Application of Agricultural Remote Sensing Engineering Technology, Wuhan, Hubei 430062, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal characteristics of soil conservation function and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir area were scientifically evaluated, in order to provide a scientific basis for the establishment of soil erosion control models in the water source area of the middle route of the south-to-north water transfer project and the soil and water conservation and ecosystem safety management in the basin. [Methods] The InVEST model and the geographical detector method were used to quantitatively analyze the temporal and spatial characteristics of soil conservation function and its influencing factors in Danjiangkou Reservoir area in 2010, 2015 and 2020. [Results] Firstly, from 2010 to 2020, both of the actual amount of soil erosion and the soil erosion grade in the Danjiangkou Reservoir area decreased, and the spatial distribution trend in each year was basically consistent. Secondly, the conserved soil in Danjiangkou Reservoir area in

收稿日期: 2021-05-26

修回日期: 2021-08-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“垄作覆膜对土壤无机氮流失过程的影响机理”(41471227); 湖北省自然科学基金项目(2016CFB201); 区域开发与环境影响湖北省重点实验室开放基金项目(2018(C)002)

第一作者: 廖雯(1996—), 女(汉族), 安徽省淮南市人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感与土地利用。Email: liaowen9611@126.com。

通讯作者: 胡砚霞(1987—), 女(汉族), 湖北省汉川市人, 讲师, 硕士生导师, 主要从事生态环境遥感监测研究。Email: yanxiahu@hubei.edu.cn。

2010, 2015 and 2020 was  $6.25 \times 10^9$  t,  $6.62 \times 10^9$  t and  $7.12 \times 10^9$  t, respectively, which showed a gradual upward trend, indicating that the soil conservation function of the Danjiangkou Reservoir area has been continuously enhanced. Thirdly, the soil conservation function was varied in different altitude ranges. The quantity of soil conservation was larger in higher altitude areas, such as Funiu Mountains in the northeast, Qinling Mountains in the west, and Wudang Mountains in the southwest. The quantity of soil conservation was smaller in lower-altitude areas, such as the area around the Danjiangkou Reservoir. The quantity of soil conservation of different land-use types was also quite different, with wood land being the largest, followed by shrub rangeland, garden land and cultivated land. Last, the geographical detector analysis results showed that the changes in soil conservation function in the Danjiangkou Reservoir area were mainly affected by topographic factors. [Conclusion] In recent years, the soil conservation function in the Danjiangkou Reservoir area has been changed in a positive trend in general, although the quantity of soil conservation in some areas is still small. In the future, the returning farmland to forest land (or grassland) should continue to be promoted, and forest land and shrubland with strong soil conservation capabilities should be focused and protected so as to enhance the soil conservation function of Danjiangkou Reservoir area.

**Keywords:** InVEST model; Danjiangkou Reservoir area; soil conservation function; influencing factors; the geographical detector

土壤保持是生态系统的重要调节服务功能之一,在缓解区域土壤侵蚀和维持生态安全等方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。丹江口水库作为中国南水北调中线工程的水源地,在生态环境建设方面具有重要意义。近年来丹江口库区天然林的保护、退耕还林(草)工程以及库区移民政策的实施,区域土地利用结构发生改变,一定程度上会造成库区周围地区水土流失加剧、生态环境遭到破坏。随着丹江口水库水质监测和水土保持工作的不断推进,水源区水污染防治和水土流失治理工作产生一定成效,但部分区域仍存在不同程度的水土流失、石漠化问题。因此,有必要继续深入开展丹江口库区土壤保持研究,这将有助于认识水源地土壤侵蚀和土壤保持功能的时空变化特征及其影响因素,对保障南水北调中线工程水质安全具有重大意义。目前对土壤保持功能的研究主要是利用通用土壤流失方程 USLE(universal soil loss equation)估算潜在土壤侵蚀量、实际土壤侵蚀量和土壤保持量,并探讨土壤侵蚀量及其空间格局、土壤保持量及其生态服务功能评估、人类活动与水土保持效益的响应等<sup>[2]</sup>。尽管 USLE 模型考虑了降水、地形、土壤性质、植被覆盖和管理因子,但并未考虑地块自身拦截上游沉积物的能力,因此,通过 USLE 方程计算的土壤保持量具有一定的局限。该问题在生态系统服务评估与权衡模型 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)中可得到很好的解决。InVEST 模型的泥沙输移比和输沙量模块 SDR(sediment delivery and retention)综合了 USLE 方程和 Borselli<sup>[3]</sup>、Vigiak 等<sup>[4]</sup>人研究成果,通过计算土壤侵蚀量和泥沙输移比获取集水区产沙的空间分布,

以此描述坡面土壤侵蚀和流域泥沙输移的空间过程<sup>[5-7]</sup>,为流域水土保持、水库清淤管理及河道水质控制提供科学依据和决策支持。与传统评价方法相比,InVEST 模型有两大创新:①考虑了地块自身拦截上游泥沙的能力,使沉积物保留量的计算结果更准确;②考虑了排水层(交通道路等)的影响,由于输沙运移过程在排水层停止,将相应淤积的产沙量纳入输沙总量的计算。国内学者基于 InVEST 模型对流域或区域尺度上土壤保持量的变化特征开展了大量研究,并在不同区域尺度取得成果。近年来中国学者利用 InVEST 模型开展了大量土壤侵蚀相关研究。周彬等<sup>[8]</sup>应用 InVEST 模型对北京山区不同森林类型的土壤侵蚀状况的水土保持功能的差异进行了研究,发现各森林类型的保持土壤能力均较高;余新晓等<sup>[9]</sup>应用 InVEST 模型评估了北京山区森林生态系统的水源涵养功能,得到各森林类型的水源涵养深度差异较大的结论;白杨等<sup>[10]</sup>利用 InVEST 模型对白洋淀流域进行了生物多样性保护、土壤保持等多项生态系统服务功能的研究,表明 InVEST 模型可以很好地应用于空间化特征分析;胡胜等<sup>[2]</sup>采用 InVEST 模型探讨清淤情境下营盘山库区的土壤保持能力及其空间格局特征,发现无定河西侧支流的土壤保持能力比东侧支流偏高;党虹等<sup>[11]</sup>采用 InVEST 模型对称钩河流域土壤侵蚀及土壤保持空间分布进行了模拟,认为流域以微度侵蚀为主且梯田的土壤保持总量最高;王森等<sup>[12]</sup>采用 InVEST 模型评估了延安市退耕还林(草)前后的土壤侵蚀量、土壤保持量,认为生态工程的推进可提升区域土壤保持功能;燕玲玲等<sup>[13]</sup>对子午岭地区土壤保持变化和影响因素进行分析,发现土

壤保持服务有所增强且受多重因素的影响。以往国内学者对土壤保持功能的相关研究已经形成了比较成熟的理论和方法,但总体上主要关注于退耕还林(草)背景下不同生态系统类型或土地利用类型的土壤侵蚀量、土壤保持量和土壤保持效益的研究,大多研究为单一时间尺度,对于土壤保持的时空分布和影响因素的整体研究不多,且面向丹江口库区的相关研究较少。因此科学评估丹江口库区土壤保持功能时空特征,揭示土壤保持时空格局变化的影响因素,是保障南水北调中线工程生态安全的重要基础。

本研究利用 InVEST 模型泥沙输移比和输沙量模块 SDR 估算 2010,2015 和 2020 年丹江口库区土壤侵蚀量和土壤保持量,并借助地理探测器分析丹江口流域土壤保持功能的时空变化特征及其影响因子。研究结果可进一步深化土壤保持功能研究,为水源地水土流失治理模式的确立以及流域水土保持与生态系统安全的管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

丹江口库区位于鄂西北与豫西南的交界处,地理坐标为  $32^{\circ}11'34''-33^{\circ}52'40''N, 109^{\circ}23'7''-111^{\circ}57'55''E$ 。行政范围包括湖北省十堰市的丹江口市、郧西县、张湾区、茅箭区和郧阳区,以及河南省南阳市的淅川县和西峡县,总面积约  $1.79 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。丹江口库区东北部、西部和西南部边缘为中海拔高起伏山地,总地势呈西北高、东南低、北陡南缓,汉江沿线形成峡谷和盆地相间的地貌;气候属北亚热带季风气候区,年均温  $11.2 \sim 15.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量  $750 \sim 950 \text{ mm}$ ,主要集中在 5—9 月;汉江干流与其支流丹江在此交汇,河网发达;土壤类型丰富,以山地黄棕壤和黄褐土为主,且有水稻土、紫色土、石灰土等非地带性土壤发育;植被类型以常绿针叶林、落叶阔叶林和针阔混交林为主,除山区有少量原始森林外,多为次生林,浅山多为荒山或灌丛,盆地是主要的农耕地<sup>[14]</sup>。南水北调中线工程从该库区引水,其对资源开发、环境保护和跨区调水等方面具有重要意义。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤保持模型 本研究将应用 InVEST 模型中的泥沙输移比和输沙量模块 SDR 计算土壤保持量,并依据丹江口库区的实际情况进行改进。该模型综合了 USLE 方程和 Borselli<sup>[3]</sup>、Vigiak 等<sup>[4]</sup>研究成果,通过计算土壤侵蚀量和泥沙输移比获取集水区产沙的空间分布。计算步骤为:

(1) 计算存在植被覆盖和水土保持措施条件下

栅格  $i$  的实际土壤侵蚀量:

$$\text{USLE}_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i \cdot P_i \quad (1)$$

式中:  $\text{USLE}_i$  为栅格  $i$  的实际土壤侵蚀量;  $R_i, K_i, LS_i, C_i, P_i$  分别为降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被覆盖与管理因子和水土保持因子。

(2) 计算栅格  $i$  的泥沙输移比:

$$\text{SDR}_i = \frac{\text{SDR}_{\max}}{1 + \exp\left(\frac{\text{IC}_0 - \text{IC}_i}{k}\right)} \quad (2)$$

$$\text{IC} = \lg\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right) \quad (3)$$

$$D_{up} = \overline{CS} \sqrt{A} \quad (4)$$

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{C_i S_i} \quad (5)$$

式中:  $\text{SDR}_i$  为存在植被覆盖与水土保持措施条件下的泥沙输移比;  $\text{SDR}_{\max}$  为最大理论 SDR 值,一般取值 1.0; IC 为连通性指数;  $\text{IC}_0, k$  是 SDR-IC 关系的校准参数;  $\text{IC}_i$  表示流域内栅格  $i$  上的单位泥沙从流域中到达河道的可能性;  $D_{up}$  为上游集水区土壤侵蚀量,表示上游泥沙向下游河道输送的潜能;  $C$  为上坡产沙区域的平均面积;  $S$  为上坡产沙区域的平均坡度;  $A$  表示上坡产沙面积;  $D_{dn}$  为下游集水区土壤侵蚀量,表示泥沙经过水流路径到达汇点的可能性;  $d_i$  为按水流方向计算的栅格  $i$  的坡长;  $C_i, S_i$  分别表示栅格  $i$  的植被覆盖因子和坡度。

(3) 计算流域内栅格  $i$  的土壤保持量  $T_i$ :

$$T_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot (1 - C_i \cdot P_i) \cdot \text{SDR}_i \quad (6)$$

由此分别计算得到 2010,2015 和 2020 年丹江口库区土壤保持量估算结果。

1.2.2 土壤侵蚀强度等级划分 根据水利部 2007 年公布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL190-2007)》<sup>[15]</sup>,将实际土壤侵蚀量的强度划分 6 个等级:微度侵蚀 [ $< 5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]、轻度侵蚀 [ $5 \sim 25 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]、中度侵蚀 [ $25 \sim 50 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]、强烈侵蚀 [ $50 \sim 80 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]、极强烈侵蚀 [ $80 \sim 150 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ] 和剧烈侵蚀 [ $> 150 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ]。

1.2.3 地理探测器原理 地理探测器是王劲峰<sup>[16]</sup>研究团队提出的用以探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法。该模型通过空间异质性来探测因变量与自变量之间空间分布格局的一致性,并据此度量自变量对因变量的解释度<sup>[17-18]</sup>,地理探测器包括 4 个模块:因子探测器、生态探测器、风险探测器和交互作用探测器,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (7)$$

式中: $q$  为探测力指标,值域 $[0,1]$ ;  $q$  值越接近于 1,表示自变量对因变量的解释力越强;  $N$  为整个区域样本单元数;  $N_h$  为次一级区域样本单元数;  $L$  为次级区域个数;  $\sigma^2$  为整个区域的方差;  $\sigma_h^2$  为次一级区域的方差。

本研究拟利用因子探测器识别地理环境因子对土壤保持量分布的影响程度,应用生态探测器确立地理环境因子之间的相对重要性,基于风险探测器量化地理环境因子不同类型或不同范围对土壤保持量的影响,并应用交互作用探测器比较地理环境因子之间的交互作用。

### 1.3 数据来源

遥感数据为 Landsat TM/OLI 影像,分辨率为 30 m,来源于美国地质调查局 USGS(United States Geological Survey, <http://earthexplorer.usgs.gov/>),包括 2010,2015 和 2020 年 3 个年份,时相上尽量为 4—6 月或 9—10 月,云量少,且为植被的生长季。经几何纠正和大气校正后,辅助野外采样、高程和坡度等信息,采用 K-Means 非监督分类方法将丹江口库区土地分为林地、灌草地、耕地、水体、建设用地区和园地 6 大类型,并进行精度验证,使其符合后处理要求;地形数据为 30 m 分辨率的 ASTER GDEM 数据,来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),需对其进行填洼处理;气象数据包括 2010,2015 和 2020 年丹江口库区及周边 12 个气象站点月均降雨量数据,来源于中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn/>);土壤质地和有机碳数据来源于世界土壤数据库(HWSD);GDP 数据来源于湖北省统计年鉴。以上数据均重采样到 30 m 分辨率并转换至统一的投影坐标系统,以满足模型运行要求。

### 1.4 数据处理

(1) 降雨侵蚀力因子( $R$ )。基于丹江口库区及周边 12 个气象站点月降水量数据利用 Wischmeier 公式<sup>[19]</sup>和克里金插值法获取  $R$  值及其空间分布。

(2) 土壤可蚀性因子( $K$ )。反映土壤抗侵蚀的能力,受土壤质地、土壤有机质含量等土壤理化性质的影响。利用 EPIC 模型<sup>[20]</sup>中土壤有机质和土壤颗粒分析的  $K$  值计算方法获取。

(3) 坡长坡度因子( $LS$ )。对 DEM 数据进行填洼处理,将其输入 InVEST 模型计算  $LS$  值<sup>[21]</sup>。

(4) 植被覆盖与管理因子( $C$ )。反映植被或作物管理措施对土壤侵蚀量的影响。采用蔡崇法等<sup>[22]</sup>提出的植被覆盖与管理因子研究方法,获取不同植被覆盖度下的林地、灌草地及其他土地利用类型的  $C$  值(表 1)。

(5) 水土保持因子( $P$ )。采取与未采取(顺坡种植)水土保持措施时土壤侵蚀量的比值。基于实地状况以及文献资料获取研究区不同土地利用类型的  $P$  值<sup>[23]</sup>(表 1)。 $P$  值为 1 时表示未采取任何水土保持措施; $P$  值为 0 时表示采取了较好的水土保持措施,土壤几乎不会受到侵蚀。

表 1 丹江口库区 2010,2015 和 2020 年不同土地利用类型的植被覆盖与管理因子( $C$ )和水土保持因子( $P$ )

土地利用类型	C 值			P 值
	2010 年	2015 年	2020 年	
耕地	0.25	0.41	0.62	0.40
园地	0.46	0.38	0.32	0.70
林地	0.07	0.05	0.03	1
灌草地	0.31	0.26	0.02	1
水体	0	0	0	0
建设用地	0	0	0	0

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤侵蚀量评价

2.1.1 土壤侵蚀量时空变化 运用 InVEST 模型中的 SDR 模块,载入丹江口库区的 DEM 高程图、降雨侵蚀力栅格图、土壤可蚀性栅格图、流域矢量图、土地利用类型栅格图、生物物理系数表以及相关参数。模型运行后,输出模拟计算出的丹江口库区实际土壤侵蚀量分布图(附图 1,见第 376 页)。

2010,2015 和 2020 年丹江口库区实际土壤侵蚀量分别是  $1.41 \times 10^9$ ,  $9.85 \times 10^8$  t 和  $3.99 \times 10^8$  t,呈递减的趋势。空间上,2010,2015 和 2020 年实际土壤侵蚀空间分布基本一致,实际土壤侵蚀量较高地区持续减少,且 2020 年较于 2010 和 2015 年实际土壤侵蚀量较高的地区明显减少,多分布于库区西部秦岭和浙川北部地区,少数分布于库区内各地区。2010—2020 年实际土壤侵蚀量的减少大体上表明近些年丹江口库区对于水土流失的治理起到了一定显著的效果,但仍需对侵蚀量较高侵蚀地区采取相应的水土保持控制管理工作。

2.1.2 土壤侵蚀强度等级统计分析 据《土壤侵蚀分类分级标准》得到丹江口库区的土壤侵蚀强度各等级面积占比结果(图 1)。库区各年不同土壤侵蚀强度等级所占比例差异较大,年际上也存在较大差异。2010,2015 和 2020 年土壤侵蚀强度等级所占面积比例以微度侵蚀、轻度侵蚀为主,各年强烈侵蚀、极强烈侵蚀、剧烈侵蚀等级面积所占比例逐渐降低,微度侵蚀、轻度侵蚀等级面积所占比例逐渐增加。其中 2010—2015 年段,轻度侵蚀所占比例增加较多,

2015—2020 年段,微度侵蚀等级面积所占比例增加较多。低侵蚀等级地区分布较多且不断增加,在一定程度上表明库区侵蚀情况得到一定程度的改善。不同侵蚀等级之间单位面积的侵蚀量差异较大,高侵蚀的面积比例小而侵蚀量很大。因此,为了达到减少侵蚀量的要求,强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀区仍是丹江口库区土壤保持功能治理的重点区域。

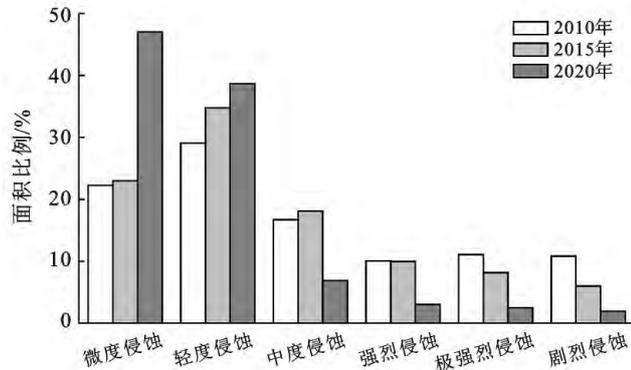


图 1 丹江口库区 2010, 2015 和 2020 年土壤侵蚀强度各等级面积比例

## 2.2 土壤保持功能评估

**2.2.1 土壤保持量的时空变化分析** 2010—2020 年丹江口库区土壤保持总量变化较为明显,库区 2010 年的土壤保持总量为  $6.25 \times 10^9$  t, 2015 年的土壤保持总量上升至  $6.62 \times 10^9$  t, 增加了 5.92%; 2020 年的土壤保持总量上升至  $7.12 \times 10^9$  t, 增加了 7.51%, 总体上呈持续增加的趋势(附图 2, 见第 376 页)。结果表明 2010—2020 年丹江口库区土壤保持强度分布一致, 且土壤保持强度持续增大, 2010 年土壤保持强度为  $3\ 566.41$  t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 2015 年上升至  $3\ 777.61$  t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 2020 年持续上升至  $4\ 063.62$  t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 2010—2020 年土壤保持功能在一定程度上得到增强。2010—2020 年丹江口库区土壤保持空间分布格局相对均匀稳定, 呈中部、东南少数地区低, 北部、西部大部地区高的空间分布格局。库区内低值区主要位于丹江口水库周边地形起伏度较小的低海拔区, 包括淅川县南部和丹江口市中部一带, 地类以耕地和建设用地为主, 植被覆盖度较低, 受到人口密集、经济建设的影响相对较大, 不利于土壤保持; 高值区主要位于山高坡陡、地形起伏明显的较高海拔的库区较高海拔的东北部伏牛山、西部秦岭、西南部武当山地区, 这些区域不易受到人类活动的干扰, 地类以林地和灌草地为主, 植被覆盖率高明显高于其他地区, 这类地区土壤实际侵蚀量较小, 土壤保持状况较为良好。丹江口库区 2010, 2015 和 2020 年的土壤保持量时间尺度上有所增加, 但空间分布差异不明显。

**2.2.2 不同土地利用类型的土壤保持量比较** 将基于 InVEST 模型得到的土壤保持数据和土地利用类型数据叠加, 得到 2010—2020 年丹江口库区不同地类的土壤保持量比例以及平均土壤保持强度(图 2)。不同土地利用类型土壤保持能力大小可用土壤保持强度来表示, 丹江口库区不同土地利用类型的土壤保持强度具有明显差异。不同的土地利用类型, 可能受植被覆盖度和面积大小的影响, 土壤保持强度差异显著, 林地和灌草地的土壤保持能力远高于耕地。2010, 2015 和 2020 年, 林地的土壤保持能力最高, 其次是灌草地、园地, 耕地较低, 耕地和园地具有类似的土壤保持能力。2010—2020 年平均土壤保持能力排序为: 林地 > 灌草地 > 园地 > 耕地。研究表明, 林地、灌草地和耕地是研究区主要的土地利用类型, 且耕地面积较大, 土壤保持能力较小, 潜在的土壤侵蚀风险较大。因此, 应采取适当的水土保持措施提高耕地的土壤保持能力, 从而降低产沙量, 增大研究区的土壤保持能力。

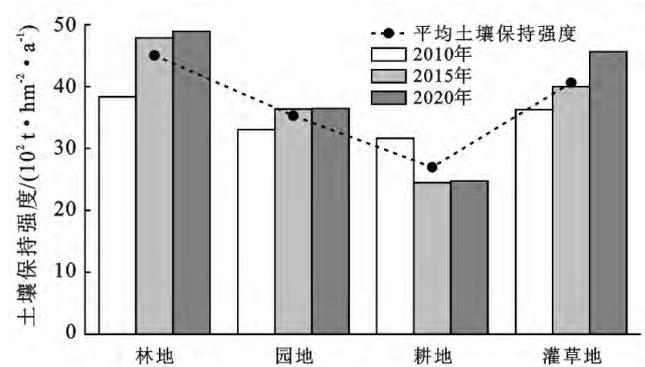


图 2 丹江口库区 2010, 2015 和 2020 年不同土地利用类型土壤保持能力统计

## 2.3 土壤保持功能变化的影响因素分析

基于丹江口库区土壤保持功能的时空变化特征, 为进一步分析库区土壤保持功能的时空变化影响机制, 不仅应考虑气候、地形、土壤、植被几大自然因素的综合作用, 还应考虑社会经济活动等人为因素的干扰, 这些因素在复杂的交互作用下形成了土壤保持服务功能。降水影响土壤侵蚀性, 土壤随海拔高度呈有规律的变化, 植被可保护表土从而减少土壤流失量, 而土地利用类型、经济发展状况能够反映人类活动强弱。本文将 2015 年作为研究年份, 以土壤保持量为因变量, 综合考虑自然和人为因素的影响, 筛选了降水、地形、植被来反映自然状况; 土地利用类型、GDP 等社会经济因素来表征人类活动, 借助地理探测器方法对库区土壤保持功能变化的主要影响因素进行探测分析。

**2.3.1 因子探测** 因子探测可探测土壤保持功能的空分异性以及各因子在多大程度上解释土壤保持功能的空分变异。统计值用  $q$  表示,  $q$  值愈大说明对

分析变量的解释力愈强<sup>[17]</sup>。结果表明不同因子的解释力差异显著,各因子按  $q$  值大小降序排列为:地形 > 降水 > 土地利用类型 > GDP > 植被覆盖度(表 2)。其中土壤保持变化受地形、降水、土地利用类型的影

响较强,GDP 和植被覆盖度的作用较弱。结果表明地形具有最高的  $q$  统计量,说明各因子变量中地形对土壤保持功能空间变异的解释能力最强,是揭示土壤保持变化的最主要的环境因子。

表 2 地理探测器的因子探测

因子	植被覆盖度	降水	地形	土地利用类型	GDP
$q$ 统计量	0.009 2***	0.019 7***	0.030 2***	0.016 8***	0.015 7***

注:\*\*\*表示的各因子在 0.1%水平上显著( $p < 0.001$ )。

2.3.2 交互探测 交互探测可识别不同因子之间的交互作用以及评估两因子共同作用时是否会增加或减弱对分析变量的解释力<sup>[17]</sup>。结果表明任何两种因子对土壤保持功能空间分异的交互作用都要大于一个因子单独作用,且两两因子之间对土壤保持变化均起到双因子增强的作用(表 3)。总体上土壤保持功能的变化受到自然和社会经济因素的共同作用,但两种因子对土壤保持变化的影响强弱方面,降水∩地形的贡献率最高为 3.97%;地形∩GDP,地形∩土地利用类型,植被覆盖度∩地形,降水∩土地利用类型贡献率较高,分别为 3.62%,3.51%,3.32%,3.26%;而植被覆盖度∩土地利用类型的交互作用最弱。其中,降水和地形因子交互作用影响力最强,地形和 GDP、土地利用类型因子交互作用次之,这说明生态系统土壤保持功能的变化是自然和社会经济因素综合作用的结果,在降水等自然要素相对稳定的背景下,应控制人类活动对土地利用结构的干扰强度,增加植被覆盖度,进而提高库区生态系统的土壤保持功能。

表 3 地理探测器的交互探测结果

因子	植被覆盖度	降水	地形	土地利用类型	GDP
植被覆盖度	0.009 2	—	—	—	—
降水	0.027 9	0.019 7	—	—	—
地形	0.033 2	0.039 7	0.030 2	—	—
土地利用类型	0.019 1	0.032 6	0.035 1	0.016 8	—
GDP	0.023 5	0.028 9	0.036 2	0.029 8	0.015 7

2.3.3 生态探测 生态探测可用于比较各因子间对分析变量空间分异的影响是否有显著差异<sup>[17]</sup>。结果表明对于土壤保持功能变化的影响上,地形与植被覆盖度之间存在着显著差异,其他各因子之间不存在显著差异(表 4)。这表明自然因素对土壤保持变异的影响显著,而社会经济因素在生态探测中对其变化不存在显著性差异。因此增加植被覆盖度等生态工程建设有助于防治土壤侵蚀和控制水土流失,从而提高土壤保持功能。

表 4 地理探测器的生态探测结果

因子	植被覆盖度	降水	地形	土地利用类型	GDP
植被覆盖度	—	—	—	—	—
降水	N	—	—	—	—
地形	Y	N	—	—	—
土地利用类型	N	N	N	—	—
GDP	N	N	N	N	—

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

作为国家南水北调中线工程的水源地,生态系统的土壤保持功能对丹江口库区具有重要意义。研究分析结果显示,近年来丹江口库区土壤保持功能总体趋势积极向好,但一些地形起伏度较小的低海拔区土壤保持量仍较低,说明这类地区受到土壤侵蚀和水土流失的潜在威胁较大。探测结果表明,几大自然和人为影响因子对丹江口库区土壤保持功能的作用强度不同,主要受地形因子以及降水与地形交互作用的影响,由于降水、地形等自然因子具有不可控性及工程措施费用昂贵,增加植被覆盖度、降低坡耕地比重等生态工程建设在防治土壤侵蚀和控制水土流失方面发挥着重要作用。因此,对于丹江口库区而言,继续推进退耕还林(草)工程建设,重视与保护土壤保持能力较强的林地和灌草地,同时减少人类活动对地表的扰动及其对库区生态环境的污染与损害,降低水土流失造成的面源污染和土地退化等生态风险,才能更好地保障区域生态安全与肩负起“清水永续北送”的政治责任。

鉴于 InVEST 模型中其中因子取值通常借鉴以往学者研究,可能不适应于库区实际情况,未来研究仍需对 InVEST 模型相关参数与计算方法进行校正、检验,使之适应于库区的生态系统土壤保持服务功能评估。仅以 2015 年为例利用地理探测器方法研究丹江口库区土壤保持功能的影响因子,受多种因素的交互影响,未来有必要对多个年份开展研究以揭示不同影响因子强弱在时序上的变化规律,以此实现对该区

域生态系统服务功能的全面了解。本研究通过对丹江口库区的土壤保持功能进行时空特征和影响因素分析,可为区域水土保持和生态管理建设提供参考。

### 3.2 结论

(1) 2010, 2015 和 2020 年丹江口库区实际土壤侵蚀量分别是  $1.41 \times 10^9$ ,  $9.85 \times 10^8$  t 和  $3.99 \times 10^8$  t, 呈递减趋势。各年实际土壤侵蚀强度空间格局基本一致,实际土壤侵蚀量高值区持续减少,土壤侵蚀等级均逐渐向微度侵蚀转变,侵蚀情况得到一定程度的改善。但不同侵蚀等级之间单位面积的侵蚀量差异较大,仍要注意治理侵蚀等级高区域,以达到减少侵蚀量的要求。

(2) 2010, 2015 和 2020 年丹江口库区土壤保持总量持续增加,分别为  $6.25 \times 10^9$ ,  $6.62 \times 10^9$  t 和  $7.12 \times 10^9$  t, 空间分布结果表明,库区海拔较高的东北部伏牛山、西部秦岭、西南部武当山地区土壤保持量较高,丹江口水库周边地形起伏度较小的低海拔区土壤保持量较低。不同土地利用类型的土壤保持强度等级差异较明显,其中林地和灌草地这类植被覆盖率较高地区的土壤保持能力较强,耕地土壤保持能力最弱。

(3) 丹江口库区土壤保持变化主要受地形因子以及降水与地形交互作用的影响,在一定程度上表明自然因素对库区生态系统的土壤保持功能时空变化起到重要作用,但在各因子的交互作用下,土壤保持呈现差异化时空分布格局。

### [ 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] 胡胜,曹明明,刘琪,等.不同视角下 InVEST 模型的土壤保持功能对比[J].地理研究,2014,33(12):2393-2406.

[3] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment [J]. Catena, 2008,75(3):268-277.

[4] Vigiak O, Borselli L, Newham L T H, et al. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio [J]. Geomorphology, 2012, 138(1):74-88.

[5] Terrado M, Acuña V, Ennaanay D, et al. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin [J]. Ecological Indicators, 2014,37(A):199-209.

[6] Hamel P, Chaplin-Kramer R, Sim S, et al. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA [J]. Science of the Total Environ-

ment, 2015,524/525(15):166-177.

[7] 王森.延安市土地利用变化及其土壤保持功能效应研究[D].北京:中国科学院大学,2018.

[8] 周彬,余新晓,陈丽华,等.基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟[J].水土保持研究,2010,17(6):9-13.

[9] 余新晓,周彬,吕锡芝,等.基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J].林业科学,2012,48(10):1-5.

[10] 白杨,郑华,庄长伟,等.白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J].生态学报,2013,33(3):711-717.

[11] 党虹,葛丽娟,赵传燕,等.基于 InVEST 模型的称钩河流域土壤保持功能研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2018,54(5):633-639.

[12] 王森,王海燕,谢永生,等.延安市退耕还林前后土壤保持生态服务功能评价[J].水土保持研究,2019,26(1):280-286.

[13] 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.

[14] 鄢铁平,廖炜,李璐,等.丹江口库区土地利用结构与格局优化[J].水土保持研究,2012,19(1):11-15.

[15] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

[16] 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.

[17] Wang Jinfeng, Li Xinhui, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(1):107-127.

[18] Wang Jinfeng, Yi Hu. Environmental health risk detection with geog-detector [J]. Environmental Modelling and Software, 2012,33:114-115.

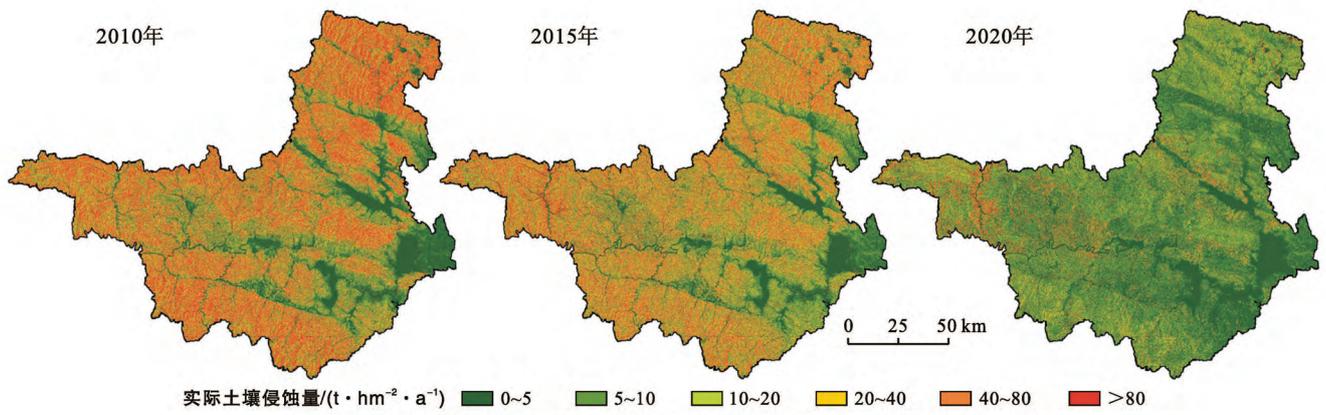
[19] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971,26(5):189-193.

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

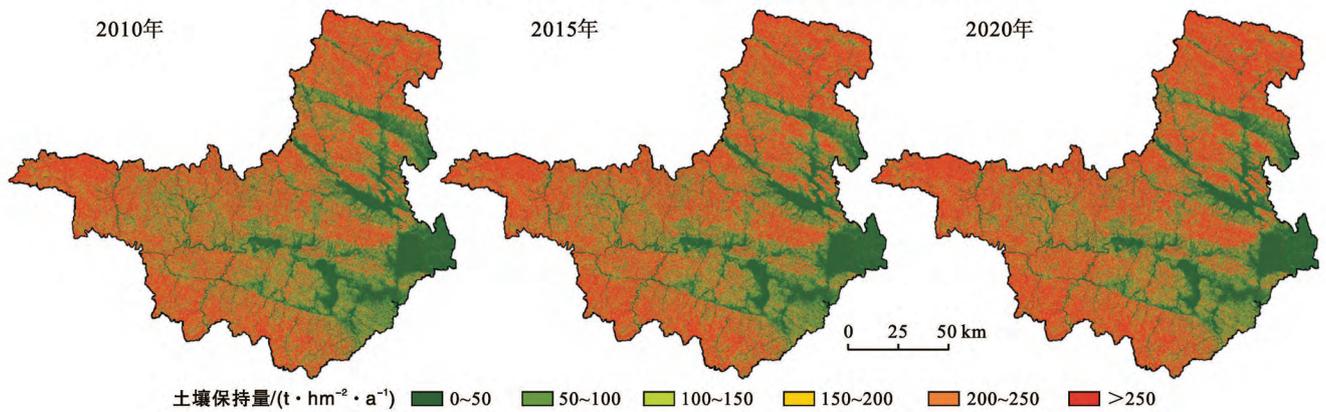
[21] Desmet P J J, Govers G. Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1996,10(3):311-331.

[22] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.

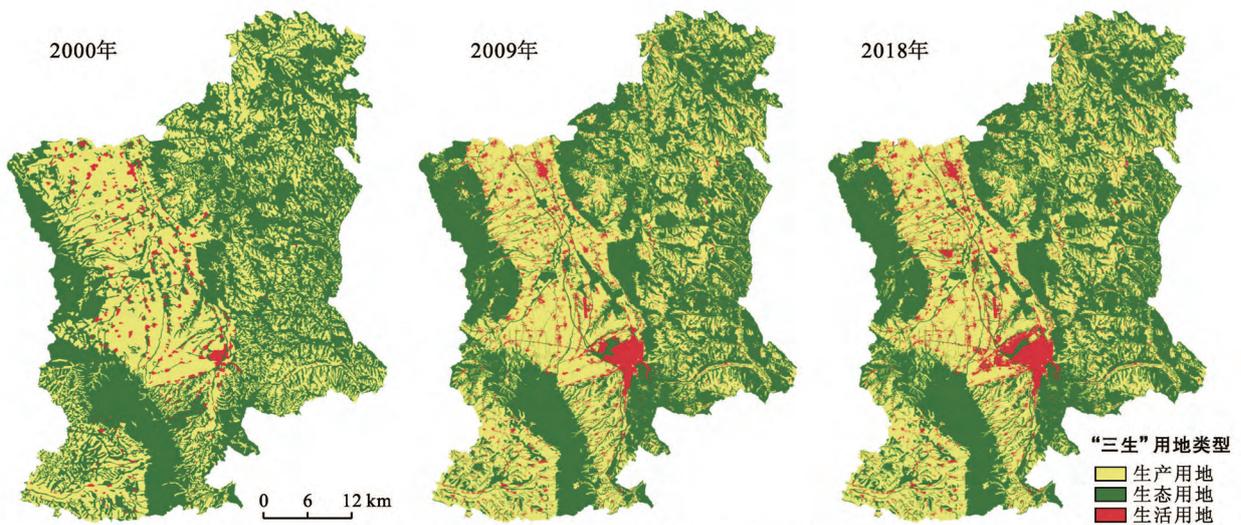
[23] 师长兴.长江上游输沙尺度效应研究[J].地理研究,2008,27(4):800-810.



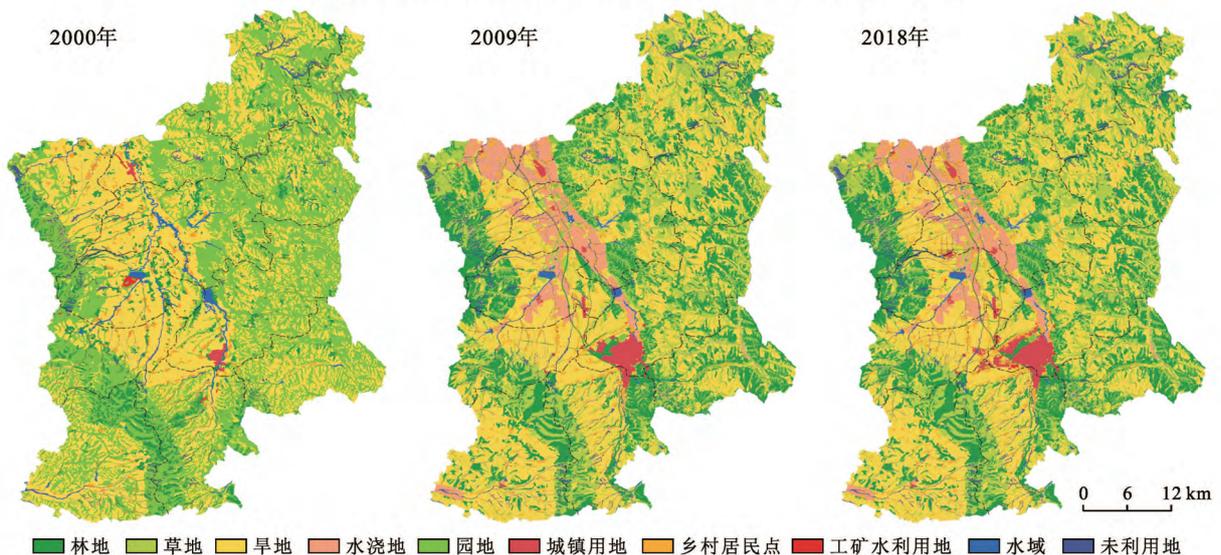
附图1 丹江口库区2010, 2015和2020年实际土壤侵蚀量空间分布(第291页)



附图2 丹江口库区2010, 2015和2020年土壤保持量分布(第292页)



附图3 宁夏固原市原州区2000—2018年“三生”用地格局变化(第299页)



附图4 宁夏固原市原州区2000—2018年土地利用类型变化(第299页)