

DOI: 10.11766/trxb201510070343

基于InVEST模型的商洛市水土保持生态服务功能研究^{*}

陈姗姗¹ 刘康^{1†} 李婷² 袁家根¹

(1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

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

摘要 以南水北调中线工程重要水源地商洛市为研究对象, 采用生态系统服务和交易的综合评估模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs, InVEST) 中的土壤保持模块 (Sediment Retention Model), 从水文角度对商洛市的地块截留、土壤侵蚀与土壤保持进行生态系统功能定量评估和空间异质性分析, 进一步探讨该区在水库清淤和保证水质两种情境下的土壤保持效益与空间特征。结果表明: (1) 商洛市潜在与实际土壤侵蚀量分别为 1.21×10^9 t、 3.4×10^7 t。该区整体处于轻度侵蚀与中度侵蚀级别, 无极强度侵蚀。(2) 全区输出的产沙总量为 1.61×10^6 t, 土壤保持总量为 1.17×10^9 t, 其中泥沙持留量为 2.9×10^7 t。旬河、金钱河与乾佑河泥沙持留能力强。(3) InVEST模型评估排除死库容后在减轻泥沙淤积和保证水质治理花费两种情境下, 土壤保持总价值分别为205.5亿元和616.3亿元。单位面积土壤保持价值量分别为313.6元hm⁻² a⁻¹和824.1元hm⁻² a⁻¹。

关键词 InVEST模型; 土壤侵蚀; 泥沙持留; 商洛市

中图分类号 P964 **文献标识码** A

不同土地利用/土地覆被下的土壤流失、土壤保持、效益评价与时空动态研究历来受到诸多学者关注^[1-4]。侵蚀控制和沉积物保持是生态系统服务功能的重要方面^[5], 它为土壤形成、植被固着、水源涵养等提供了重要基础, 同时也为生态安全与系统服务提供了保障^[6]。土壤保持功能既可以保持土壤养分, 减少养分流失, 也可以降低流入河流的泥沙量, 防止沉积物堆积而造成的水库淤积、水环境恶化、库容减少和堤防安全等问题。对于水库上游区, 降低水利工程洪涝风险和保证水质等问题有重要意义^[7]。

现阶段, InVEST模型集精细、定量、空间表达与综合性强等优势成为评估与预测生态系统服务功能很好的方法与工具。数据与参数的适宜性成为模型可靠与否的关键。近几年, 国内学者运用InVEST土壤保持模型进行了相关研究, 成功运用

于北京山区^[8]、海南岛^[9]、白洋淀^[10]、密云水库^[11]、汶川灾区^[12]等地区。但大多数研究以传统算法(通用土壤流失方程)为主, 忽略了地块自身拦截上游沉积物的能力和水库死库容的影响, 特别是水源区更应该考虑水库清淤和保证水质下的土壤保持能力, 而且较多研究是从多种生态服务功能进行全面评估, 单个评估过程的细化分析略显不足。本文基于此从以下三个方面加以改进:

(1) 部分参数本地化和个别参数的实地率定与校验。(2) 基于三级土地利用类型, 依据植被覆盖度、耕地类型和坡度细分赋值等方式更好地反演地表植被覆盖差异的影响。(3) 基于水文学意义的子流域为单元, 且细化土壤保持模块子流域单元图层, 以期实现其结果在县域和小面积流域单元上较可靠的空间表达。

InVEST模型的土壤保持模块是基于土壤流失

* 环保部重点项目(STSN-05-26)、西北大学研究生自主创新项目(YZZ14009)和国家林业公益性行业科研专项(201304309)资助 Supported by the Key Project of the Environmental Protection Department (No.STSN-05-26), Graduate Student Self-innovation Project of Northwest University (No.YZZ14009), and The Special Scientific Research of State Forest Public Welfare Profession of China (No.201304309)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuk63@126.com

作者简介: 陈姗姗(1984—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为生态评估。E-mail: chenshanhan018@163.com

收稿日期: 2015-10-07; 收到修改稿日期: 2015-12-08

方程(USLE)原理构成，在此基础上有三大突破性改进。第一，该模型可根据每个植被像元捕获及持留土壤侵蚀物的能力，计算像元中被下游地区植被所拦截的土壤侵蚀量；第二，在土壤保持生态系统服务价值模块中加入了流域水库的死库容数据，计算减去死库容截留泥沙疏浚等费用，且提供了水库清淤(sed_ret_dr_x)和保证水质(sed_ret_wq_x)两种情境下的土壤保持量与土壤保持生态系统服务价值量的计算，为水库与流域管理者提供针对性的参考。同时，此模型的最大优势就是实现空间异质性显示，即可直观反映流域水文土壤保持分布与特征，较单纯文字方式的描述更显优越。

商洛市位于秦岭山地东部，属于流水侵蚀的中低山区，坡陡土薄，部分浅山区土壤侵蚀较大。作为国家南水北调中线工程的重要水源地，水资源十分重要，不但承担着保证水量与合格水质的作用，同时也对保持水土、优化生态水环境、减少河道水库淤积起着主导作用。本文采用InVEST模型开展商洛市土壤保持功能研究，以期为研究区小流域水土流失的防治、水库泥沙治理与管理、水源区生态补偿和土地利用结构调整提供理论依据与决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

商洛市位于陕西省东南部，秦岭山脉的东段南麓($108^{\circ}34'20'' \sim 111^{\circ}01'25''E$, $33^{\circ}02'30'' \sim 34^{\circ}24'40''N$)(图1)。土地总面积19 590 km²。商洛市地处秦巴山区，是我国南北交界处重要的生物基因库和生态屏障，也是国家南水北调工程的重要水源涵养地。洛河、丹江、金钱河、旬河及乾佑河五大水系分属长江黄河两大流域。流域面积约19 290 km²。气候类型为暖温带半湿润季风气候。多年平均气温为11.1~14.0℃之间，多年平均降水量687~804mm之间，全年雨量较丰富，7日—9月为年降水高峰值，占全年降水50%以上。地貌类型由河谷川原、低山丘陵和中山地貌组成。本区分布土壤主要有棕壤、褐土、新积土、潮土、水稻土和紫色土。植被类型主要有阔叶林、针叶林、针阔混交林、阔叶灌丛、灌草丛和山地草甸等。

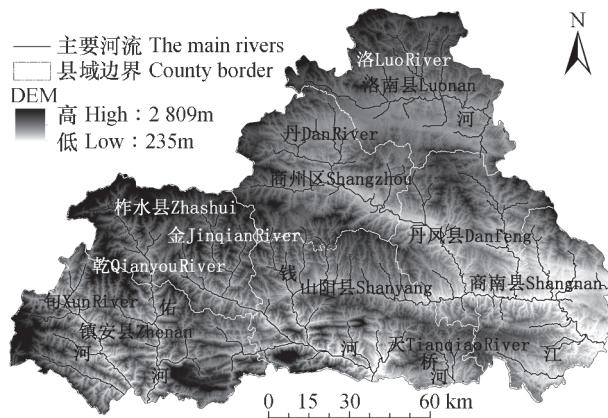


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

1.2 研究方法

分别采用InVEST 2.5.3版本的土壤保持模型中的Soil Loss模块和Valuation模块，模型具体算法可参见InVEST 2.5.3版本使用技术指南^[7]。

1.3 数据处理

InVEST模型土壤保持模块运行需要的准备数据包括：流域边界(Watersheds)、子流域(Sub-Watersheds)、DEM、降雨侵蚀力(Erosivity)、土壤可蚀性(Erodibility)、研究区土地利用类型图(Landuse)、参数因子表(Biophysical table)(包括：植被覆盖因子(usle_c)、水土保持措施因子(usle_p)、泥沙持留效率(sedred_eff))、坡度坡长(LS)与阈值、沉积物参数表(Sediment threshold table)和价值参数因子表(Sediment valuation table)。模型运行需要相同分辨率和投影坐标的栅格图层。本文统一采用30 m × 30 m分辨率、WGS_1984_Albers投影坐标系统的栅格数据。参数本地化依据：商洛市商南县鹦鹉沟小流域实验区数据(流域内建成径流小区28个)。

2 结果

2.1 土壤侵蚀量特征

商洛市潜在与实际土壤侵蚀量分别为 $1.21 \times 10^9 t$ 、 $0.34 \times 10^8 t$ 。根据水利部2007年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》，即微度侵蚀($< 5 t hm^{-2}$)、轻度侵蚀($5 \sim 25 t hm^{-2}$)、中度侵蚀($25 \sim 50 t hm^{-2}$)、强度侵蚀($50 \sim 80 t hm^{-2}$)、极强度侵蚀($80 \sim 150 t hm^{-2}$)和剧烈侵蚀($> 150 t hm^{-2}$)

表1 数据来源与参数本地化

Table 1 Data sources and localization of parameters

模块 Module	基础数据 Basic data	参数获取与校验处理 Parameter acquisition and calibration
土壤保持模块 Soil loss	土地利用Landuse 高程DEM 流域Watersheds 子流域Sub_Watersheds 降雨侵蚀力Erosivity 土壤可蚀性Erodibility 坡度坡长LS 植被覆盖因子usle_c 水土保持措施因子usle_p 泥沙持留率sedred_eff 坡度与阈值 土壤保持生态系 统服务价值模块 Valuation	HJ-1卫星CCD数据（陕西省生态十年下发解译后的数据，准确率较高）2010年 DEM，洼地填充处理 大面积流域边界范围基础上提取商洛市县域 基于DEM水文与河网子流域提取 ^[13] ，生成385个子流域 卜兆宏 ^[14] 的雨量雨强模型，鹦鹉沟为代表站点 EPIC模型，土壤质地数据来源：《商洛土壤》商洛地区土壤资源质量评价参数表 坡长因子采用Wischmeier和Smith ^[15] 计算方法；坡度因子采用McCool ^[16] 和刘宝元 ^[17] 方法 蔡崇法等 ^[18] 根据植被覆盖度，耕地根据坡度细化赋值（0~7°；7~15°；15~25°；>25°） 数值0~1之间。林地与梯田实地率定，其他类型结合相关研究以及当地土地利用、农事活动情况确定相应的土地利用类型P值 ^[19-21] 模型数据库66种泥沙持留效率值，同时以陕南河流泥沙输移比估算表为参考修正 ^[22-24] 依据《商洛土壤》数据中slope分级，边坡阈值以47%为率定值 水库清淤状况下土壤保持量栅格图层（sret_sm_dr）、保证水质状况下沉积物持留量 土壤保持模型结果数据（sret_sm_wq）和结果表（watershed sediment retention table） 依据《商洛市地区实用水文手册》提取7个高级别水库死库容dr_deadvol，水库剩余年限 40年，未来时间情境模拟设置为35年。依据《湖泊河流环保疏浚工程技术指南》确定保 证泥沙淤积的疏浚成本为3元 m ⁻³ 和保证水质的环保疏浚最低成本为15.2元 m ⁻³

分级标准，商洛市子流域平均土壤侵蚀量（usle_mn）介于2.56~54.00 t hm⁻²之间。该区整体处于轻度侵蚀与中度侵蚀级别，无极强度侵蚀。侵蚀强度由小到大分别占全区总面积的1.07%、84.37%、14.37%和0.18%。各子流域土壤侵蚀总量（usle_sm）介于 1.36×10^3 t~ 4.22×10^5 t之间，潜在土壤侵蚀量介于0~431.04 t hm⁻²。五大流域侵蚀模数由大到小分别为：旬河（22.32 t hm⁻²）>乾佑河（20.86 t hm⁻²）>金钱河（20.38 t hm⁻²）>丹江（15.21 t hm⁻²）>洛河（13.96 t hm⁻²），具体如表2所示。

从空间分布图2b可知：就主要的五大流域实际土壤侵蚀空间特征而言，侵蚀强度较大的面积主要分布于旬河、乾佑河和金钱河流域，即镇安县与山阳县的南部，洛河流域东部面积次之，丹江流域土壤侵蚀强度整体较轻，其中的会峪河、资峪河与老君河土壤侵蚀较严重。潜在土壤侵蚀量对于认识

县域小尺度的侵蚀高危险区和制定土壤流失防治措施具有重要意义，图2a反映了385个小流域的潜在土壤侵蚀量，潜在土壤侵蚀平均值表征了土壤流失程度，其中旬河西部与乾佑河北部土壤侵蚀程度较高。由图2b可知，丹江作为南水北调水源供给主要流域，侵蚀模数较低，除中部部分地区，整体面积属于轻度侵蚀。

2.2 土壤保持量特征

研究区输出的泥沙总量为 1.61×10^6 t，模型结果中像元最大产沙量为 2.04×10^3 t，最小值为0。五大流域输沙能力由大到小依次为乾佑河（0.29 t）>金钱河（0.28 t）>旬河（0.23 t）>洛河（0.19 t）>丹江（0.17 t）。流域输沙不但能够反映地块沉积物输出状况，而且子流域输沙量情况可以为水沙管理提供参考依据。商洛市泥沙持留量为 2.90×10^7 t，子流域单元沉积物持留量最大值为 3.85×10^3 t；商洛市土壤总保持量为 1.17×10^9 t，

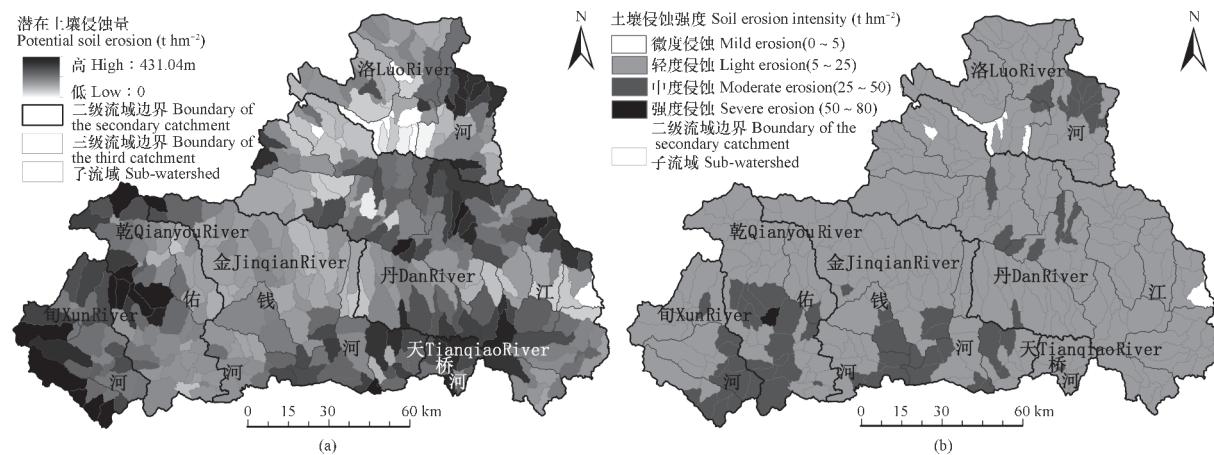


图2 子流域潜在土壤侵蚀量 (a) 和实际土壤侵蚀强度分级 (b)

Fig. 2 Potential and actual soil erosion rates (a) and soil erosion intensity grading (b) of the watersheds in Shangluo

表2 商洛市流域潜在与实际土壤侵蚀量

Table 2 Potential and actual soil erosion rates of the watersheds in Shangluo

流域 Watersheds	流域面积 Watersheds area ($\times 10^5 \text{ hm}^2$)	土壤侵蚀总量		子流域土壤侵蚀平均值		侵蚀模数 ($t \text{ hm}^{-2}$)
		Potential	Actual	Potential	Actual	
		($\times 10^8 \text{ t}$)	($\times 10^6 \text{ t}$)	($\times 10^2 \text{ t}$)	(t)	
洛河 Luo River	2.70	1.47	3.77	1.37	3.54	13.96
丹江 Dan River	7.29	4.67	11.09	1.60	3.87	15.21
旬河 Xun River	1.62	1.37	3.62	2.12	5.65	22.32
乾佑河 Qianyou River	2.54	1.74	5.30	1.72	5.29	20.86
金钱河 Jinqian River	4.18	2.56	8.52	1.53	5.19	20.38
天桥河 Tianqiao River	0.34	0.29	0.63	2.16	4.75	18.80

单位面积土壤保持量为 $6.20 \times 10^2 \text{ t hm}^{-2}$ 。实际土壤保持量的平均值表征了研究区流域单元在水保措施下减轻土壤流失后的地块保土能力。由大到小依次为：旬河($2.12 \times 10^2 \text{ t}$)>乾佑河($1.72 \times 10^2 \text{ t}$)>丹江($1.60 \times 10^2 \text{ t}$)>金钱河($1.53 \times 10^2 \text{ t}$)>洛河($1.37 \times 10^2 \text{ t}$)。流域泥沙持留量平均值反映了栅格单元中每个植被像元捕获和持留土壤侵蚀物的能力，由表3可知旬河、金钱河与乾佑河流域泥沙持留量平均值分别为： 5.07 t 、 4.66 t 和 4.52 t ，说明侵蚀产生的泥沙在输移过程中因植被拦截与过滤作用中的持留能力较高。土壤保持总量较高区域分布于丹江($4.52 \times 10^8 \text{ t}$)与金钱河($2.46 \times 10^8 \text{ t}$)流域。

从子流域实际土壤保持量和泥沙持留量空间分布图3可以看出，研究区土壤保持能力空间差异性显著，镇安县、山阳县和丹凤县土壤保持能力较

强，即主要位于旬河与乾佑南部，丹江流域中部次之，洛河实际土壤保持能力最弱。三级流域中达人河、月河、资峪河、老君河、南水河和桑坪河部分子流域土壤保持量均在 780 t hm^{-2} 以上。从图3b分布特征来看各子流域泥沙持留能力与土壤保持能力的分布趋势基本一致，差异性主要集中于旬河、乾佑河以及丹江流域的东部与南部即银花河、耀岭河与清油河小流域。此外，金钱河北部、丹江流域西部和东部与洛河大部分流域面积的地块截留泥沙能力均较弱。

2.3 土壤保持生态系统服务价值空间分布

基于InVEST土壤保持模块评价结果，土壤保持生态系统服务价值模块提供了水库清淤条件下的价值和保证该区域水质条件下的价值两种评价结果。值得注意的是土壤保持生态系统服务价值量均

表3 商洛市流域产沙量、土壤保持量和泥沙持留量

Table 3 Sediment yields, soil retention rates and sediment retention rates of the watersheds in Shangluo

流域 Watersheds	产沙量 Amount of sediment export		泥沙持留量 Sediment retention value		实际土壤保持量 Actual soil conservation value		各县区土壤保持量 Soil conservation in county		
	总量 Sum	平均 Mean	总量 Sum	平均 Mean	总量 Sum	平均 Mean	县域 County territory	总量 Sum	平均 Mean
	($\times 10^6$ t)	(t)	($\times 10^6$ t)	(t)	($\times 10^8$ t)	($\times 10^3$ t)		($\times 10^8$ t)	($\times 10^3$ t)
洛河 Luo River	1.68	0.19	3.40	3.22	1.42	0.13	商州区 Shangzhou	1.37	0.13
丹江 Dan River	4.89	0.17	9.88	3.46	4.52	0.16	丹凤县 Danfeng	1.63	0.17
旬河 Xun River	1.51	0.23	3.23	5.07	1.34	0.21	商南县 Shangnan	1.34	0.16
乾佑河 Qianyou River	2.98	0.29	4.64	4.66	1.69	0.17	柞水县 Zhashui	1.47	0.16
金钱河 Jinqian River	4.65	0.28	7.39	4.52	2.46	0.15	山阳县 Shanyang	2.14	0.17
天桥河 Tianqiao River	4.02	0.30	0.56	4.21	0.28	0.21	镇安县 Zhen'an	2.36	0.18

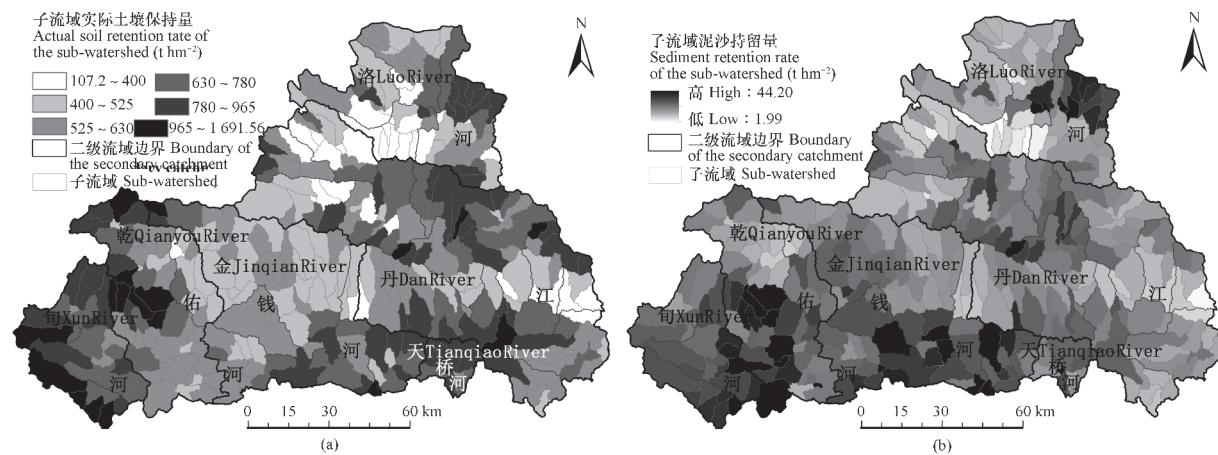


图3 子流域实际土壤保持量(a)和泥沙持留量(b)空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of actual soil retention rates (a) and sediment retention rates (b) of the sub-watersheds

为一定时间尺度内的情境模拟结果，其价值量计算结果是该时间内的总值。根据模型原理，对于前者，模型模拟了一定时间内当前土地利用/土地覆被情景下生态系统减少流域水库清淤成本的价值；对于后者，则模拟了流域水库剩余寿命时间内，生态系统保证流域水库水质的价值量。这里根据实际设置的水库剩余寿命为40年、未来土地利用与覆被方式持续时间情景尺度为35年。

研究区排除7个大中型水库死库容总计 $2.53 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，水库清淤情境下的土壤保持总量为 $9.92 \times 10^8 \text{ t}$ ，土壤保持生态系统服务在未来35年的价值总量为205.52亿元；保证水质条件下的土壤保持总量为 $9.90 \times 10^8 \text{ t}$ ，土壤保持生态系统服务在未来剩余的40年水库寿命下的价值量为616.28亿元。

由图4空间分布图可知，两种情境下土壤保持生态系统服务价值趋势基本一致，子流域土壤保持生态系统服务价值空间异质性十分明显。水库清淤下的价值量介于0.01~30.51亿元不等，385个小流域水库清淤下的价值量平均值为5.35亿元，每年单位面积土壤保持生态系统服务价值量为 $313.6 \text{ 元 hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ；保证水质下的价值量介于0.04~91.48亿元不等，其平均值为16.04亿元，每年单位面积土壤保持生态系统服务价值量为 $824.1 \text{ 元 hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。最高价值量等级主要分布于旬河南部、金钱河西南部、丹江东南部与天桥河区域以及洛河部分小流域。对于县域而言，镇安县、商南县与山阳县东部地区土壤保持生态系统服务价值最高，而洛南县南部、商州区与柞水县土壤保持生态系统服务价值较低。

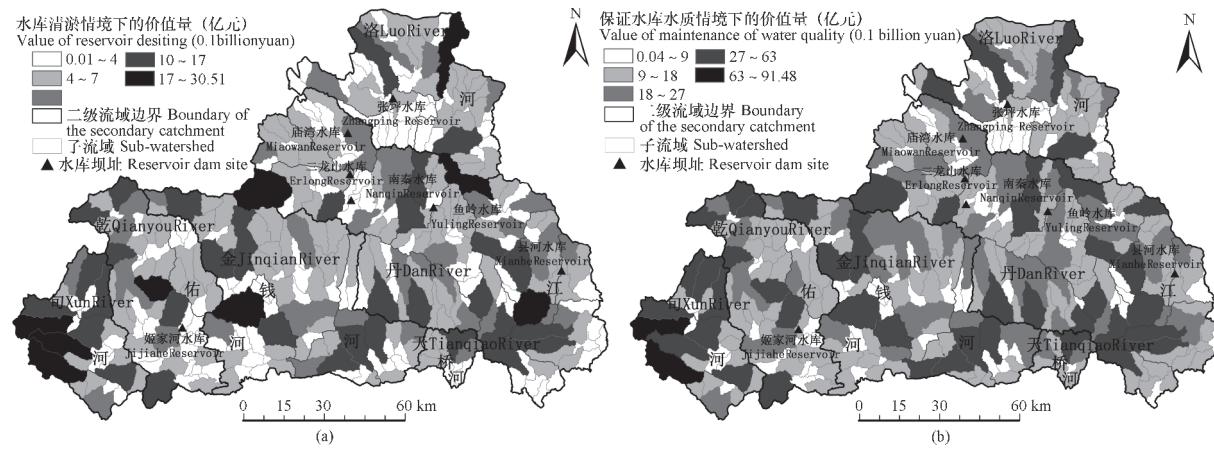


图4 子流域水库清淤情境下价值量 (a) 和保证水质情境下价值量 (b)

Fig. 4 Value of reservoir desiting (a) and value of maintenance of water quality (b) in the sub-watersheds

3 结 论

商洛市流域单元潜在土壤侵蚀量空间差异显著，整体处于轻度与中度侵蚀级别，但镇安、柞水、山阳等区域侵蚀强度较高，应加强水土保持治理工作；各单元的实际土壤保持能力与泥沙持留能力空间分布趋势基本一致，反映出植被拦截与过滤作用的持留能力越高，土壤保持能力越强，应高度重视河流两岸植被格局的配置与保护；研究区两种情境下的土壤保持生态系统服务价值量空间分布差异较大，可为小流域水土保持生态补偿实施提供衡量的依据。总体而言，商洛市水土保持工作应根据不同流域特点，统筹考虑坡面治理、防护，以及植被的截留和过滤功能，合理配置植被群落结构和空间格局，以最大限度发挥水土保持生态功能。

参 考 文 献

- [1] 李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展. 土壤学报, 2008, 45 (5) : 802—809
Li Z B, Zhu B B, Li P. Advancement in study on soil erosion and soil and water conservation (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5) : 802—809
- [2] 卞鸿雁, 庞奖励, 任志远, 等. 基于土地利用变化的土壤保持效益时空动态——以黄土高原南部为例. 生态学杂志, 2012, 31 (9) : 2391—2396
Bian H Y, Pang J L, Ren Z Y, et al. Effects of land use change on soil conservation value in southern Loess Plateau of Northwest China (In Chinese) . Chinese Journal of Ecology, 2012, 31 (9) : 2391—2396
- [3] 任志远, 刘焱序. 西北地区植被保持土壤效应评估. 资源科学, 2013, 35 (3) : 610—617
Ren Z Y, Liu Y X. Estimating the ecological effect of soil conservation by vegetation in Northwest China (In Chinese) . Resources Science, 2013, 35 (3) : 610—617
- [4] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44 (1) : 7—13
Zhang K L, Peng W Y, Yang H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (1) : 7—13
- [5] Costanza R, d' Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387 (6630) : 253—260
- [6] 盛莉, 金艳, 黄敬峰. 中国水土保持生态服务功能价值估算及其空间分布. 自然资源学报, 2010, 25 (7) : 1105—1113
Sheng L, Jin Y, Huang J F. Value estimation of conserving water and soil of ecosystem in China (In Chinese) . Journal of Natural Resources, 2010, 25 (7) : 1105—1113
- [7] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. InVEST 2.5.3 user's guide. The Natural Capital Project, Stanford, 2013
- [8] 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. 林业科学, 2012, 48 (10) : 1—10
Yu X X, Zhou B, Lü X Z, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST Model (In Chinese) . Scientia Silvae Sinicae , 2012, 48 (10) : 1—10
- [9] 饶恩明, 肖燚, 欧阳志云, 等. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素. 生态学报, 2013, 33 (3) : 746—755
Rao E M, Xiao Y, Ouyang Z Y, et al. Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island (In Chinese) . Ecological Research, 2013, 33 (3) : 746—755

- Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (3) : 746—755
- [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. *生态学报*, 2013, 33 (3) : 711—717
Bai Y, Zheng H, Zhuang C W, et al. Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: Based on InVEST model (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (3) : 711—717
- [11] 王大尚, 李屹峰, 郑华, 等. 密云水库上游流域生态系统服务功能空间特征及其与居民福祉的关系. *生态学报*, 2014, 34 (1) : 70—81
Wang D S, Li Y F, Zheng H, et al. Ecosystem services' spatial characteristics and their relationships with residents' well-being in Miyun Reservoir watershed (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (1) : 70—81
- [12] 彭怡. InVEST 模型在生态系统服务功能评估中的应用研究——以四川汶川地震灾区为例. 北京: 中国科学院大学, 2010
Peng Y. Application of InVEST Model in ecosystem services assessment: A case study from Wenchuan earthquake area (In Chinese). Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010
- [13] 赵亚萍, 黄岩, 邱道持. 数字流域河网提取中的阈值问题研究. *信阳师范学院学报*, 2008, 21 (2) : 232—235
Zhao Y P, Huang Y, Qiu D C. Application and study of extracting digital stream network from elevation model (In Chinese). *Journal of Xinyang Normal University*, 2008, 21 (2) : 232—235
- [14] 卜兆宏, 董勤瑞, 周伏建, 等. 降雨侵蚀力因子新算法的初步研究. *土壤学报*, 1992, 9 (4) : 408—417
Bu Z H, Dong Q R, Zhou F J, et al. Preliminary study on new algorithm of erosive factor of Rainfall (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 9 (4) : 408—417
- [15] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning. Washington: US Department of Agriculture, 1978, 537
- [16] McCool D K, Brown L G, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30 (5) : 1387—1396
- [17] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 90—113
Liu Y B, Xie Y, Zhang K L. *Soil Erosion Prediction Model*. Beijing: Science and technology of China press, 2001: 90—113
- [18] 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. *水土保持学报*, 2000, 14 (2) : 19—24
Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14 (2) : 19—24
- [19] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀影响的定量分析. *地理学报*, 2012, 67 (5) : 599—608
Gao H D, Li Z B, Li P, et al. Influences of terrace construction and check dam silting-up on soil erosion (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67 (5) : 599—608
- [20] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展. *应用生态学报*, 2002, 13 (8) : 1033—1036
Zhang Y, Yuan J P, Liu B Y. Advance in researches on vegetation cover and management factor in the soil erosion prediction model (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (8) : 1033—1036
- [21] 吕玉娟, 彭新华, 高磊, 等. 红壤丘陵岗地区坡地地表径流氮磷流失特征研究. *土壤*, 2015, 47 (2) : 297—304
Liu Y J, Peng X H, Gao L, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses through surface runoff on sloping land, red soil hilly region (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (2) : 297—304
- [22] 吴成基, 甘枝茂. 陕南河流泥沙输移比问题. *地理科学*, 1998, 18 (1) : 39—44
Wu C J, Gan Z M. The problem about the river silt delivery ratio in South Shaanxi (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18 (1) : 39—44
- [23] 张晓明, 曹文洪, 周利军. 泥沙输移比及其尺度依存研究进展. *生态学报*, 2014, 34 (24) : 7475—7485
Zhang X M, Cao W H, Zhou L J. Progress review and discussion on sediment delivery ratio and its dependence on scale (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (24) : 7475—7485
- [24] 梁音, 张斌, 潘贤章, 等. 南方红壤区水土流失动态演变趋势分析. *土壤*, 2009, 41 (4) : 534—539
Liang Y, Zhang B, Pan X Z, et al. Changes of soil and water loss in red soil region of Southern China (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 (4) : 534—539

Evaluation of Ecological Service Function of Soil Conservation in Shangluo City Based on InVEST Model

CHEN Shanshan¹ LIU Kang^{1†} LI Ting² YUAN Jiagen¹

(1 College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

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

Abstract Soil conservation is an important service function of an ecosystem. Therefore, the study on soil erosion and mass and value of soil conservation of a valley may provide some essential bases for soil-water conservation, regulation of land use patterns, eco-compensation and reservoir management in the areas of the Project of Water Diversion from South to North. For that end, Shangluo, a major water source region of the project, was cited for quantitative evaluation and spatial heterogeneity analysis of the ecological service functions of land retention, soil erosion and soil conservation therein from the angle of hydrology, using the sediment retention sub-model of the InVEST (Integrated Valuation and Trade offs of Ecosystem Services) model to ensure accuracies of in-situ acquisition, verification, colliberation and input of parameters, and for further exploration of benefits and spatial characteristics of the soil-water conservation pracies of ensuring water quality and desiting in the region, in expectation of providing some theoretical basis and reference to decision-makers.. Results show that (1) the total potential and actual soil erosion rate of Shangluo City was 1.21×10^9 t and 3.4×10^7 t, respectively, implying that the region, on the whole, was rated “slight” and “moderate” in soil erosion and had no sign of severe erosion, and the five watersheds (Luo River, Dan River, Jinqian River, Qianyou River and Xun River) in the region were all in the categories of slight and moderate erosion; (2) The total sediment output from the region was 1.61×10^6 t, whereas the total soil retention rate of the region was approximately 1.17×10^9 t, of which 2.9×10^7 t was of sediment, and among the five watersheds, Xun River, Jinqian River and Qianyou River were very high in sediment retention capacity; (3) the total ecological service value of the soil conservation in the region reached 205.5 million yuan and 616.3 million yuan in terms of reduction of sediment accumulation and insurance of water quality and was averaged to be 313.6 yuan $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ and 824.1 yuan $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$, excluding the consideration of dead reservoirs; and (4) to prevent and control soil erosion, priorities should be given to optimization of land use, improvement of regional ecological benefit, development of forestry and amelioration of the soil and build-up of soil and water conservation capacity, which should start from small watersheds, with special attention to soil-water management of forest-grass interlaced areas, terrace fields on slopes and ridge-furrow tillage and construction projects.

Key words InVEST model; Soil erosion; Sediment retention; Shangluo City

(责任编辑：檀满枝)