

# 甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能 时空变异及其影响因子

柳冬青, 巩杰, 张金茜, 马学成

(兰州大学 资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:**土壤保持是生态系统提供的调节服务之一,在缓解区域侵蚀和维持生态安全等方面发挥着重要作用。基于 InVEST 模型和地理探测器等方法,开展了甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能时空变异及其影响因子分析。结果表明:(1) 2002—2014 年流域生态系统土壤保持功能不断增强,但空间格局变化不大;(2) 各土地利用类型、海拔、坡度及坡向上土壤保持功能均有所提升,且保土功能增幅表现出随海拔抬升而减小,随坡度递增而增加的趋势;(3) 降水量变化是流域土壤保持功能变化的主要因素,其与农作物单产变化、土地利用类型变化分别交互后的因子影响力较大。由于降水具有不可控性,因此,降低人类农业活动干扰,增加植被覆盖有利于甘肃白龙江流域土壤保持功能的提高。研究结果可为西北山地流域土壤保持和生态系统管理提供参考。

**关键词:**土壤保持; InVEST 模型; 地理探测器; 甘肃白龙江流域

中图分类号:S157; X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0098-06

## Spatiotemporal Variation of Soil Conservation Function and Its Influencing Factors in Bailongjiang Watershed in Gansu Province

LIU Dongqing, GONG Jie, ZHANG Jinxi, MA Xuecheng

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Soil conservation is one of the regulatory services provided by ecosystems, which plays an important role in mitigating regional erosion and maintaining ecological security. Based on the InVEST model and Geodetector analysis, the spatiotemporal variation of the soil conservation function and its influencing factors of the Bailongjiang Watershed in Gansu Province were analyzed in this paper. The results showed that: (1) the soil conservation function constantly increased from 2002 to 2014 at the watershed scale, and the spatial pattern change of soil conservation was not obvious; (2) from 2002 to 2014, soil conservation function increased in all land use types, elevation, slope and aspect, respectively; the growth of soil conservation function decreased with the increase of elevation, and increased with the increase of slope; (3) the change of precipitation was the main factor influencing the change of watershed soil conservation function, it influenced apparently with the interaction of the crop unit area yield change and land use type change, respectively; while precipitation was uncontrollable, to decrease the disturbance of human agricultural activities and to increase the vegetation coverage would be great beneficial for the improvement of soil conservation function in Bailongjiang Watershed in Gansu Province. The results can provide reference for the soil conservation and ecosystem management in the mountainous area in northwestern China.

**Keywords:** soil conservation; InVEST model; Geodetector; Bailongjiang Watershed in Gansu Province

收稿日期:2017-08-26

修回日期:2017-09-14

资助项目:国家自然科学基金“甘肃白龙江流域景观格局与生态系统服务功能时空变化研究”(41271199);甘肃省民生科技计划项目“天水南部山区地质灾害监测预警、生态—经济发展研究与集成示范”(1503FCME006)

第一作者:柳冬青(1993—),男,安徽黄山人,硕士研究生,研究方向为景观生态学、土地变化科学。E-mail:liudq16@lzu.edu.cn

通信作者:巩杰(1975—),男,甘肃宁县人,博士,硕士生导师,主要从事景观生态学、土地变化科学、生态系统服务、环境遥感与生态评价等研究。E-mail:jgong@lzu.edu.cn

生态系统的土壤保持服务是土壤形成、植被固着和水源涵养等服务功能的重要基础,对区域水土保持和生态安全等具有重要意义。因而备受国内外土壤学、生态学等相关学科学者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>,但前期集中于依赖统计数据对水土保持生态系统服务价值的评估<sup>[4-5]</sup>,难以反映其在空间上的分布特征。随着土壤流失定量预测模型的提出和完善(通用土壤流失方程 USLE、修正通用土壤流失方程 RUSLE 等),生态系统土壤保持功能的空间定量化和分布格局研究逐步受到重视<sup>[6-7]</sup>,但此类模型并未考虑地块自身拦截上游沉积物的能力,导致土壤保持量计算存在一定问题。近年来,经广泛应用和验证,这一问题在生态系统服务协同与权衡模型(InVEST)中得到了很好的解决,而且该模型与多时段遥感数据、GIS 空间分析的结合,促进了土壤保持功能及其价值的时空动态研究<sup>[8-9]</sup>。研究发现,土壤保持空间分布受坡度影响较大<sup>[10]</sup>,植被盖度的提高有利于土壤保持功能的强化<sup>[11]</sup>。土壤保持功能变化因素的研究方面,多是基于不同地形或 LUCC 下土壤保持功能的统计差异<sup>[12]</sup>和单位面积生产总值、单位面积第一产业生产总值、人口密度等与单位面积土壤保持量的相关性分析<sup>[13]</sup>来揭示自然过程、经济发展与人口增长对土壤保持功能的影响。但土壤保持功能年际间的动态因子和各因子贡献率大小的研究尚无报道。

地理探测器是 Wang 等<sup>[14]</sup>开发的分析地理空间因素对人类健康影响机理的一种方法。目前,已逐渐运用到毛乌素沙地景观格局、北京市居民宜居社会等方面<sup>[15-16]</sup>,研究表明,地理探测器在时空动态因子、各因子贡献率及因子交互作用等方面的研究具有一定优势<sup>[17-18]</sup>。甘肃白龙江流域地处青藏高原、秦巴山地和黄土高原交错过渡带,是长江上游重要的水源涵养区和生态屏障,但流域地形破碎,地貌复杂、滑坡和泥石流频发,水土流失严重,深刻地影响着流域的土壤保持。因此,本文基于 InVEST 模型和地理探测器,分析甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能的空间变化及其影响因子,旨在为流域水土保持与生态系统安全管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

甘肃白龙江地处甘肃省东南部(32°36′—34°24′N, 103°00′—106°30′E),位于青藏高原向黄土高原和秦巴山地交错过渡带上。行政单元主要包括迭部县、舟曲县、宕昌县、武都区 and 文县,流域面积为 1.84 万

km<sup>2</sup>。流域地势西北高东南低,海拔 600~4 828 m,主要地貌类型有高原山地地貌、河谷地貌及黄土地貌等。气候类型复杂多样,属于暖温带湿润气候向北亚热带湿润气候过渡带,夏季高温多雨,冬季温暖少雨,年均温 6~14.9℃,年降水量约 400~850 mm,且主要集中在 5—10 月。土壤类型以棕壤、暗棕壤、高山草甸土、褐土等为主;植被类型主要是亚高山针叶林、高山灌木林、落叶阔叶林、落叶阔叶和常绿阔叶混交林等,覆盖度较高。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 土壤保持模型

生态系统土壤保持功能用土壤保持量表示,本文采用 InVEST 模型中的土壤保持空间制图和评估功能来获取,土壤保持功能包含侵蚀减少和泥沙滞留两部分,计算公式为:

$$\text{SEDRET}_x = \text{RKLS}_x - \text{USLE}_x + \text{SEDR}_x \quad (1)$$

$$\text{RKLS}_x = R_x \times K_x \times \text{LS}_x \quad (2)$$

$$\text{USLE}_x = R_x \times K_x \times \text{LS}_x \times P_x \times C_x \quad (3)$$

$$\text{SEDR}_x = \text{SE}_x \prod_{y=1}^{x-1} \text{USLE}_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - \text{SE}_z) \quad (4)$$

式中:SEDRET<sub>x</sub>和 SEDR<sub>x</sub>分别为栅格 x 的土壤保持量(t)和泥沙滞留量(t);RKLS<sub>x</sub>是基于地貌和气候条件下栅格 x 的潜在土壤侵蚀量(t);USLE<sub>x</sub>和 USLE<sub>y</sub>分别是考虑了管理、工程措施后栅格 x 及其上坡栅格 y 的实际侵蚀量(t);R<sub>x</sub>,K<sub>x</sub>,LS<sub>x</sub>,C<sub>x</sub>,P<sub>x</sub>分别为栅格 x 的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长坡度因子、植被覆盖和管理因子和土壤保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)反映降雨对土壤剥离、搬运及地表冲刷能力的大小,是降水引起土壤侵蚀及流失的潜在能力的体现。本文采用章文波等<sup>[19]</sup>提出的逐月降雨量数据估算降雨侵蚀力模型。利用 2002—2014 年白龙江流域及邻近地区 17 个气象站点的日降水数据算出月降雨量,进行 Kriging 空间插值,得到流域年降雨侵蚀力栅格图。

(2) 土壤可蚀性因子(K)指土壤对侵蚀的敏感性反应,可衡量土壤颗粒被降雨分离和搬运的难易程度。本文采用 EPIC 模型进行计算,并利用张科利等<sup>[20]</sup>研究成果进行结果校正。

(3) 坡长坡度因子(LS)是形成具有侵蚀能力径流并导致侵蚀事件发生的主要地形因子,可表示地形地貌特征对土壤侵蚀的影响。本文所用的 InVEST 模型 3.2.0 版本可根据研究区的 DEM 数据自动计算 LS。

(4) 植被覆盖管理因子(C)指一定条件下,某类

特定作物或植被实施植被管理措施后的土壤流失量与未实施管理措施时的土壤流失量的比值。 $C$ 因子与植被覆盖度密切相关。因此,本文采用 NDVI 估算植被盖度,再根据蔡崇法等<sup>[21]</sup>建立的盖度与  $C$  值的关系公式进行  $C$  值的计算。

(5) 水土保持措施因子( $P$ )是在有、无水土保持措施情况下,土壤流失量的比值,值域为  $0\sim 1$ ,数值大小与水保措施效果呈负相关。参考前人研究成果<sup>[13]</sup>,结合研究区土地利用及农事活动状况(视水域为无侵蚀发生),将耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地的  $p$  值分别定为  $0.15, 1, 1, 0, 1, 1$ 。

(6) 泥沙持留量(SE)代表了侵蚀产生的泥沙在输移过程中,植被过滤、拦截上游地块泥沙沉积物的能力,其值越大,则持留效率越高。不同土地利用类型的泥沙持留能力不同,本文参照 InVEST 模型数据库获得不同土地利用类型的泥沙持留效率。

## 2.2 地理探测器分析

地理探测器是探测地理现象空间分异性,揭示其驱动因素的一组统计学方法。其核心思想是基于地理现象总是存在特定的空间位置,影响其变化的驱动因子在空间上具有差异性,若某驱动因子对地理现象有重要影响,则地理现象与该驱动因子的空间分布应具有相似性的假设<sup>[22]</sup>。探测器主要由风险探测、因子探测、生态探测和交互探测组成,各探测器原理及交互关系判定详见文献<sup>[22]</sup>。其模型为:

$$PD = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (8)$$

式中: $i=1, \dots, n$ ;  $L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层或分区;  $N$  和  $N_i$  分别为全区和层  $i$  的样本数;  $\sigma_i^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $i$  和全区的  $Y$  值的方差;  $PD$  为探测因子的探测力值,值域为  $[0, 1]$ ,值越大表明因子  $X$  对变量  $Y$  的解释力越强。

## 2.3 数据来源

所用数据主要有:(1) 2002 年、2014 年两期土地

利用数据参考国土资源部 2007 年颁布的《土地利用现状分类标准》(GB/T21010—2007),并结合研究区实际情况,对 2002 年、2014 年两期 Landsat TM 遥感影像进行人工目视解译和实地选点验证得到(Kappa 系数为  $84.59\%$ ,满足精度要求);(2) 30 m 分辨率 DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);(3) 流域及周边 17 个气象站点 2002—2014 年的月降雨数据来源于甘肃省气象局、流域各县(区)气象局和中国气象数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/>);(4) 2002—2014 年流域 NDVI 数据来源于国家科学数据服务平台(<http://www.cniscas.cn>);(5) 土壤粒度等理化性状数据为 2014 年 7—8 月采样和试验分析所得;(6) 2002—2014 年各县区人口、农作物产量等社会经济数据来源于《甘肃省统计年鉴》。

## 3 结果与分析

### 3.1 甘肃白龙江流域水土保持时空变化特征

甘肃白龙江流域生态系统水土保持总量有所增加,从 2002 年的 8.88 亿 t 增加到 2014 年的 10.45 亿 t,水土保持功能得到增强。其空间分布格局基本维持稳定,高值区主要分布在流域下游的武都东南部和文县东部(如让水河、大团鱼河等流域)、流域上游的冻列乡—卡坝乡一带的石质山区和自然保护区,这些区域的人类活动和地表扰动的影响相对较小;低值区多集中于宕昌—舟曲—武都—文县段白龙江河谷近岸地带(图 1A、图 1B),这一区域人口密度大、人类活动频繁、滑坡泥石流等地质灾害多发,扰动强,不利于水土保持<sup>[23]</sup>。时间尺度上,流域水土保持功能整体提高,高值区水土保持强度增大的同时,低值区(如岷江宕昌段)水土保持功能得到了改善,但迭部西北部和文县中西部(关家沟、渭沟等流域)水土保持量有所下降(图 1C)。

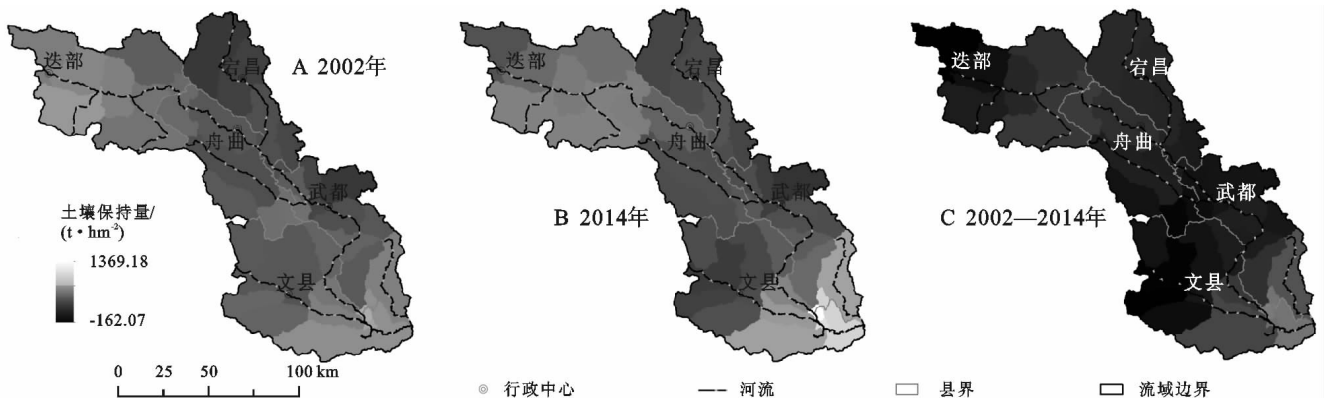


图 1 2002—2014 年甘肃白龙江流域水土保持及其变化量空间分布

### 3.2 土壤保持随土地利用类型的变化

土壤保持因植被覆盖不同而存在一定差异。以 2002—2014 年土地利用类型转移数据分区统计土壤保持变化量,得到各土地利用类型单位面积土壤保持变化量,最终得到主要土地利用类型单位面积土壤保持量变化转移矩阵(表 1)。相对于 2002 年、2014 年各地类土壤保持功能都有所提高,这主要是生态建设工程(退耕还林还草工程、长江中上游防护林建设等)和公众水土保持意识的提高等造成的。其中,由耕地和建设用地转为林地的土壤保持增长量最大(表 1),说明随着植被覆盖的增加,土壤保持功能逐渐增强。

表 1 单位面积土壤保持量变化转移矩阵

土地利用类型	2002 年			
	耕地	草地	林地	建设用地
耕地	66.64464	48.93126	121.6211	136.2729
草地	53.11509	68.0461	95.95285	98.42701
林地	161.7119	78.2797	109.9992	296.3672
建设用地	46.9652	87.03827	76.96914	34.59777

### 3.3 土壤保持功能随地形因子的变化

地形地貌制约着流域人类活动的分布与强度,影响着土壤保持功能的空间分布。2002—2014 年土壤保持变化与海拔、坡度及坡向分区统计结果见图 2。2002—2014 年甘肃白龙江流域土壤保持功能在海拔、坡度及坡向上均有所提升。海拔梯度上,呈现出明显的垂直递减特征,即随海拔抬升,土壤保持功能变化与各海拔段林、草地增加比重,建设用地和耕地减少比重均呈正相关(图 2A)。表明植被盖度的增加和人类活动干扰的减小有益于土壤保持功能的增强。随着坡度的递增,人类活动干扰减少,土壤保持功能整体呈增强趋势;小于 25°的坡段,林、草地扩张较快,建设用地与耕地比重有所下降,但人类活动较为集中,该区域土壤保持功能提高相对较小(图 2B)。流域土壤保持变化量与坡向的关系不明显,总体而言,阴坡和阳坡略低。各坡向土壤保持变化量与降水量变化大致呈负相关,与植被盖度和人类活动变化关系不大(图 2C)。

### 3.4 2002—2014 年甘肃白龙江流域土壤保持功能变化的影响因子分析

甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能变化受自然、社会与经济等多因素的综合影响。参考前人研究,根据研究区具体情况(短期内地质构造和人类活动对地形地貌的改变作用相对微弱),本文选取对土壤侵蚀有直接作用的降水量变化来体现自然过程,以土地利用类型、人口密度和农作物单产的变化来表征

植被盖度和人类活动对土地的干扰,开展各因子对土壤保持变化的探测分析。各因子分区说明见表 2。

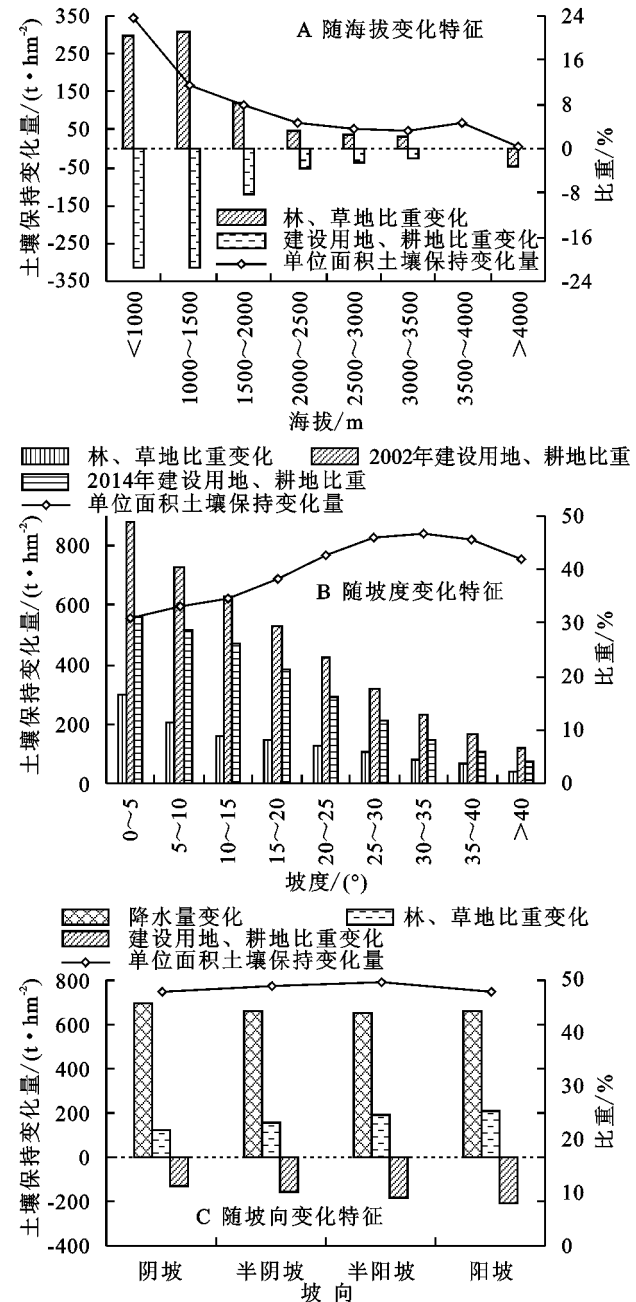


图 2 地形因子对甘肃白龙江流域土壤保持变化量的影响

风险探测可揭示各影响因子内部不同分区间的属性均值差异性。分析显示,所选因子与土壤保持变化均具有相对一致性,且都通过 0.05 水平显著性检验。

因子探测揭示了各影响因子对土壤保持变化的影响力。各因子对土壤保持变化的影响力依次为:降水量变化(0.031 4)、单产变化(0.007 1)、人口密度变化(0.002 9)、土地利用类型变化(0.002 1)。其中,降水量变化对土壤保持变化的影响最大。这是因为降水是引起土壤侵蚀的主导因素之一<sup>[24]</sup>,降水量的增加导致土壤侵蚀的加强,从而致使土壤保持量的减少。

生态探测用于比较各因子间对土壤保持变化的影响差异是否显著。降水变化量对土壤保持变化的

影响力虽然最大,但与其他因子间无显著差异,其余各因子间也无显著差异(表 3)。

表 2 地理探测因子类别化说明

影响因子	分区	说明
降水量变化	1	-79.15~-40
	2	-40~0
	3	0~40
	4	40~80
	5	80~122.73
土地利用类型变化	1	生态退化区:林、草地和水域转为耕地、建设用地和未利用地;未利用地转为耕地、建设用地
	2	生态稳定区:土地利用类型变化不明显;林、草地和水域间的转变;耕地、建设用地间的转变
	3	生态改善区:耕地、建设用地和未利用地转为林、草地;耕地、建设用地转为未利用地
农作物单产变化	1	轻微增长区:1.08~7.65 t/km <sup>2</sup>
	2	较快增长区:20.69~21.31 t/km <sup>2</sup>
	3	迅速增长区:58.94 t/km <sup>2</sup>
人口密度变化	1	减小区(<0)
	2	增加区(>0)

表 3 不同影响因子对土壤保持变化影响的统计显著性差异

显著差异	人口密度变化	降水量变化	农作物单产变化	土地利用类型变化
人口密度变化				
降水量变化	N			
农作物单产变化	N	N		
土地利用类型变化	N	N	N	

注:表中 N 表示差异性不显著。

交互探测可用来检验 2 种影响因子自身独立起作用还是相互作用,若为相互作用,作用是增强还是减弱。分析结果表明,自然和社会经济影响因子对土壤保持变化的影响均存在交互作用,任意两个因子交互后的影响力均表现为双因子增强或非线性增强(表 4)。其中,降水变化量和农作物单产变化交互因子影响力最强,降水变化量和土地利用类型变化交互因子次之(表 4)。这说明生态系统土壤保持功能的变化是自然和社会经济综合作用的结果,在降水等气象要素相对稳定的背景下,应控制人类农业活动对地表的干扰强度,增加植被覆盖度,进而提高流域生态系统的土壤保持功能。

表 4 2 种影响因子对土壤保持变化影响的交互作用

项目	人口密度变化	降水量变化	农作物单产变化	土地利用类型变化
人口密度变化	0.0029			
降水量变化	0.0335	0.0314		
农作物单产变化	0.0078	0.0796	0.0071	
土地利用类型变化	0.0103	0.0383	0.0143	0.0021

## 4 讨论

各土地利用类型和耕作强度下的地表粗糙度、地表水分环境和各种动力场存在明显差异,从而影响土壤保持功能<sup>[6]</sup>。一般而言,由于土壤、地形等自然因子相对稳定及工程措施费用昂贵,减少坡耕地比重、增加植被盖度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。研究表明,降水量变化是甘肃白龙江流域土壤保持功能变化的主要因素,降水作用影响下,农作物单产的减少和地类植被盖度的增加有利于土壤保持功能的提高。因此,根据甘肃省主体功能区规划中以“两江一水”流域水土保持与生物多样性生态功能区为重点,构建长江上游生态屏障的客观要求,由于降水具有不可控性,该流域应加强农业科技投入,改善耕作方式和耕地质量(如修建梯田、减少翻耕深耕强度等),在降低地表扰动程度的同时提高粮食产量和居民收入,继续推进“山上退耕还林,山下治沟造地”工程建设,降低水土流失造成的面源污染和土地退化等生态风险。

土壤保持功能变化受综合因素影响,研究中考虑了不同土地利用类型的泥沙持留效果,结果较为合理,可为流域水土保持和生态安全建设提供科学依据。但对植被覆盖管理和土壤保持措施的变化考虑不够;同时,流域生态系统土壤保持功能受自然、社会和经济等多因素的综合影响,变化过程复杂。本文所选因子可能会存在代表性不足,建议后续研究进一步

分析自然—社会—经济复合系统的时空变化,进而分析土壤保持功能变化的动因。

## 5 结论

2002—2014年甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能不断增强,但空间格局变化不大。土壤保持功能在各土地利用类型、海拔、坡度及坡向上均有所提升,这种增强作用表现为随海拔升高而减小,随坡度增加而增加,这与各海拔、坡度段植被盖度和人类活动强度强弱的改变有关。

所选因子中,降水量变化是该流域土壤保持功能变化的主要因素,其与农作物单产变化、土地利用类型变化分别交互后影响较大。表明人类农业活动的有效管控,干扰程度的降低,植被覆盖度的增加等有助于提高流域土壤保持功能。

### 参考文献:

- [1] Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, et al. Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services [M]. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [2] Panago P, Imeson A, Meusburger K, et al. Soil conservation in Europe: wish or reality[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(6): 1547-1551.
- [3] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 等. 森林生态系统土壤保持价值的年内动态[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3482-3490.
- [4] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 19-25.
- [5] 余新晓, 吴岚, 饶良懿, 等. 水土保持生态服务功能价值估算[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 83-86.
- [6] 张雪峰, 牛建明, 张庆, 等. 内蒙古锡林河流域草地生态系统土壤保持功能及其空间分布[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 12-20.
- [7] 陈龙, 谢高地, 裴厦, 等. 澜沧江流域生态系统土壤保持功能及其空间分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2249-2256.
- [8] 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.
- [9] 刘睿, 周李磊, 彭瑶, 等. 三峡库区重庆段土壤保持服务时空分布格局研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(6): 932-942.
- [10] Xiao Q, Hu D, Xiao Y. Assessing changes in soil conservation ecosystem services and causal factors in the Three Gorges Reservoir region of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 172-180.
- [11] 许联芳, 张海波, 张明阳, 等. 南方丘陵山地带土壤保持功能及其经济价值时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9): 1599-1606.
- [12] 陆传豪, 代富强, 周启刚. 紫色土区小流域土壤保持服务功能的空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 308-315.
- [13] 饶恩明, 肖焱, 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[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 746-755.
- [14] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. Environmental Modelling & Software, 2005, 20(10): 114-115.
- [15] Peng L, Yang X P. Landscape spatial patterns in the Mu Us Sandy Land in the northern China and their impact factors [J]. Catena, 2016, 145: 321-333.
- [16] 湛东升, 张文忠, 余建辉, 等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 966-975.
- [17] Ju H R, Zhang Z X, Zuo L J, et al. Driving forces and their interactions of built-up land expansion based on the geographical detector—a case study of Beijing, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 30(11): 1-20.
- [18] 徐秋蓉, 郑新奇. 一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法[J]. 测绘学报, 2015, 44(S1): 96-101.
- [19] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 33-40.
- [20] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 4(1): 7-13.
- [21] 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.
- [22] 王劲峰, 徐成. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [23] 谢余初, 巩杰, 赵彩霞. 甘肃白龙江流域水土流失的景观生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 702-708.
- [24] 谢红霞, 李锐, 杨勤科, 等. 退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 569-576.