

# InVEST 模型在石羊河流域生态系统 水源供给中的应用前景与方法

曾建军, 李元红, 金彦兆, 胡想全, 王军德

(甘肃省水利科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 针对石羊河流域生态系统水源供给服务功能存在的问题, 在研究和学习国内外有关 InVEST 模型并结合石羊河流域具体的生态系统水源供给特点基础之上, 建立了基于 GIS 和 SWAT 平台的 InVEST 模型, 可通过估算石羊河流域生态系统的水源供给量, 诊断出石羊河流域水源供给服务时空变化的主要原因。精确估算石羊河流域生态系统的水源供给量对于摸清流域生态系统水源供给服务现状及指导流域可持续发展具有重要意义, 同时为石羊河流域规划和管理提供决策依据。

**关键词:** 水源供给服务; 生态系统; InVEST 模型; 石羊河流域

中图分类号: P467、P339

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0083-05

## Applicable prospect and method of inVEST model in water supply of ecological system of Shiyang river basin

ZENG Jianjun, LI Yuanhong, JIN Yanzhao, HU Xiangquan, WANG Junde

(Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In view of Shiyang river basin ecosystem problems of water source supply and on the basis of study about inVEST model in home and abroad, the paper built InVEST model based on GIS and SWAT platform. InVEST model is the main method to estimate the water source supply amount. Through estimating the volume of water supply of ecosystem in Shiyang river basin, the paper found out the reason of temporal and spatial change of water supply service in Shiyang river basin. The precise estimation of water supply of ecosystem has great significance for the service situation of water supply and the sustainable development of the basin, and can provide the basis for plan and management of the basin.

**Key words:** water source supply service; ecosystem; InVEST model; Shiyang river basin

生态系统为人类生存和发展提供相应的空间和所需要的各种资源, 并吸纳人类生产、生活所产生的废弃物。人类从生态系统获取的各种效益统称为生态系统服务功能<sup>[1]</sup>, 生态系统服务研究是生态系统评估的核心<sup>[2]</sup>。以往对生态系统功能的研究多以静态的价值量评估为主, 对物质的动态变化及成因研究相对较少, 对其生态学机制的关注也不多<sup>[3-8]</sup>。在生态系统服务功能评估中, 考虑到生态系统格局的复杂性和交叉性, 科研工作者认识的差异性, 及评估过程主观性和不确定性, 使评估过程难

以用于实际操作, 评价结果差异加大<sup>[9-10]</sup>。

水源供给作为一项重要的生态系统服务, 近年来随着生态系统服务研究的迅速发展, 其供给服务的变化及其影响机制开始受到关注<sup>[11-14]</sup>。当前国内外关于模型对生态系统水源供给量的研究尺度多集中单个类型(如湿地、草地、水源区等)进行的定量或定性评估, 而基于大流域行政区域尺度的不同生态环境下的评估研究甚少<sup>[15-19]</sup>。再鉴于目前生态系统水源供给量的确定具有很多主观性和不确定性, 评估结果难以用于实际操作。因此, 寻求一种物

收稿日期: 2015-07-29; 修回日期: 2015-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51369003、51369004); 水利部公益性行业科研专项(201301081)和甘肃省技术研究与开发专项计划项目(1205TCYA005)

作者简介: 曾建军(1986-), 男, 甘肃榆中人, 在读博士, 助理工程师, 主要从事水资源与生态环境方面研究。

通讯作者: 李元红(1955-), 男, 甘肃庆阳人, 学士, 高级工程师(教授级), 主要从事水资源高效利用与雨水利用技术的研究工作。

理意义明确、实用的评价模型来精确估算大尺度生态系统水源供给量具有极为重要的理论研究价值和现实意义。由于 InVEST 模型可以简便的量化和价值化生态系统服务功能,使最终的评估结果直观地体现其空间格局和重要程度,也被政府及相关部门运作纳入到资源管理和可持续发展规划决策中去<sup>[1,20-24]</sup>。

## 1 InVEST 模型发展历程

2007年由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发了 InVEST(The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool)模型,用于快速简便的量化和价值化生态系统服务功能,从而更好地为政府及相关部门提高可靠的依据<sup>[21-25]</sup>。InVEST 模型由水模型和非水模型两大部分组成。其中,水模型包括产水、水源涵养、水质、减洪、土壤保持、减少泥沙淤积、灌溉、水电站等模块;非水模型包括生物多样性保护、木材收获、农业、传粉、碳汇等模块。

### 1.1 国外研究发展历程

目前,InVEST 在美国安第斯山等区域进行了研究和应用<sup>[21-25]</sup>。其中,加利福尼亚内华达山脉区项目组还 InVEST 评估的基础上形成了一套经济与政策杠杆选择论——许可、费用、税收、补贴、条例、投资、奖励等,以便政府相关职能机构对每种生态系统服务功能的保护优先度作出选择,对当地政府及相关部门生态系统服务功能管理提供了较为科学的规划依据。

### 1.2 国内研究发展历程

国内对 InVEST 模型的应用研究起步于 2010 年。自此,根据文献报道,许多学者应用 InVEST 模型先后在诸多区域做了研究<sup>[3,26-34]</sup>(表 1),并组织开展各类重大科研项目。其研究内容涵盖水源涵养、土壤保持和碳储存、面源污染以及生物多样性的空间变化评价<sup>[3,26-34]</sup>。通过对不同研究区生态系统服务功能的定量研究,为生态系统功能维持、服务价值与生态补偿核算以及生态系统综合管理提供理论依据。

表 1 国内关于 InVEST 模型对生态系统服务功能评估中的重大科学研究

作者	时间	研究单位	研究区	具体内容
余新晓等 <sup>[26]</sup>	2012	北京林业大学	北京山区森林	水源涵养功能评估
周彬等 <sup>[27]</sup>	2010	北京林业大学	北京山区森林	土壤侵蚀模拟
吴哲等 <sup>[28]</sup>	2013	中国热带农业科学院	海南岛	氮磷营养物负荷风险评估
潘韬等 <sup>[3]</sup>	2013	中国科学院地理所	三江源区	生态系统水源供给服务时空变化
白杨等 <sup>[29]</sup>	2013	中国科学院生态中心	白洋淀流域	生态系统服务评估及调控
杨芝歌等 <sup>[30]</sup>	2012	北京林业大学	北京山区	生物多样性分析与碳储量评估
吴健生等 <sup>[31]</sup>	2013	北京大学	深圳市	景观生态安全格源地综合识别
李屹峰等 <sup>[32]</sup>	2013	中国科学院生态中心	密云水库流域	土地利用对生态系统服务功能影响
袁志芬等 <sup>[33]</sup>	2014	中国科学院地理所	四川省宝兴县	生态系统碳储量动态评估
肖强等 <sup>[34]</sup>	2014	中国科学院生态中心	重庆市	森林生态系统服务功能价值评估

## 2 InVEST 模型在石羊河流域生态系统水源供给中的应用研究意义

石羊河流域是我国西北内陆河流域中人口最密集、生态环境问题最严重、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、水资源制约经济最强的地区<sup>[25,35-37]</sup>。随着人口增长和经济社会的发展,经济社会发展用水严重挤占生态用水,现状水资源利用模式已不能支持流域经济社会发展和满足全面建设小康社会的要求。石羊河流域严重的生态环境问题,也已经引起了政府的高度关注,2007年12月,

经国务院同意,由国家发改委、水利部印发实施《甘肃省石羊河流域重点治理规划》。为坚实初期治理成果,经甘肃省发展改革委、省水利厅、武威市共同研究争取,2011年12月,国家发展改革委、水利部《关于进一步科学有序推进石羊河流域重点治理规划实施有关工作的通知》,批复了《石羊河流域重点治理调整实施方案》,将《规划》确定的后10年任务集中到前5年实施(2011-2015)。石羊河流域重点治理完成后,作为石羊河流域生态系统服务功能评估核心的水源供给究竟如何变化,目前尚不清楚。如何在治理取得成效基础上,定量估算石羊河流域

生态系统的水源供给量,以期最大限度地提高水资源利用效率和提出石羊河流域生态系统水源供给恢复技术措施,实现社会经济的可持续发展,建立符合流域实际的最佳水资源利用与经济发展模式,为石羊河流域第四轮土地利用总体规划的修编、土地利用机构的优化以及土地资源的可持续利用提供了依据,是目前亟待解决的问题。因此,本文提出以 ArcGIS 和 Swat 模型为平台,通过引进 InVEST 模型,以定量估算石羊河流域生态系统的水源供给量,分析诊断石羊河流域生态系统不同时期水源供给服务的原因,提出主要技术恢复措施的总体思路,以期在干旱内陆河流域应用推广。

### 3 InVEST 模型在石羊河流域生态系统水源供给中的应用研究内容

#### 3.1 技术路线

针对石羊河流域生态系统水源供给服务功能存在的问题,以 ArcGIS 和 swat 模型为平台,石羊河流域大量空间数据和实测数据为基础。在对 InVEST 模型的反复验证与修正的基础上,以 InVEST 模型为主要评估方法,对石羊河流域生态系统水源供给量进行定量评估,诊断分析石羊河流域生态系统不同时期水源供给服务的原因,提出主要技术恢复措施的总体思路,也旨在为石羊河流域生态保护与建设提供依据,技术路线图详见图 1。

量之间的平衡与其它一系列的气象要素、土壤特征和地表覆盖(土地利用类型或植被覆盖类型)等密切相关。经过计算,最后得到区域产水量的空间分布图。模型简化了汇流过程,没有区分地表径流、壤中径流和基流,假设栅格产水量通过以上任意一种方式到达出水口。计算原理如公式(1)~(4)<sup>[3]</sup>:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right)P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} \cdot ET_0}{P_x} \quad (4)$$

式中: $Y_{xj}$ 为栅格单元  $x$  中土地覆被类型  $j$  的年产水量; $AET_{xj}$ 为栅格单元  $x$  中土地覆被类型  $j$  的实际蒸散量; $P_x$ 为栅格单元  $x$  的降水量; $\omega_x$ 为自然气候-土壤性质的非物理参数; $R_{xj}$ 为 Bydyko 干燥指数; $Z$ 为 Zhang 系数; $AWC_x$ 为栅格单元  $x$  的土壤有效含水量,由土壤深度和理化性质决定; $K_{xj}$ 为栅格单元  $x$  中土地覆被类型  $j$  的植被蒸散系数; $ET_0$ 为参考作物蒸散<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 InVEST 模型所需数据的收集和处理

从多种途径收集建模所需要的大量数据,包括 DEM、土地利用和土地覆被变化图、土壤类型、土壤属性数据、水文(流量)气象(降水、气温、辐射、湿度、风速、日照时数)数据的收集处理。并将不同来源与不同格式的数据进行统一处理,详见表 2,将其转换为 InVEST 模型中能够识别的代码类型,借助 GIS 建立基于 InVEST 模型的石羊河流域生态系统的水源供给空间信息数据库。

#### 3.4 研究内容

针对石羊河流域水资源危机,围绕综合治理的内容及初步成果,综合分析已有研究基础和最新研究方向。在广泛查阅资料和总结石羊河流域治理工作实际和面临的问题及规划经验基础上,结合石羊河流域地理环境特征、社会条件、经济水平、种植结构等特点,采用定性分析与定量研究相结合、统计分析数值模拟相结合的总体思路,以 InVEST 模型为主要评估方法(对于首次引进的模型不能盲目套用,必须认真了解模型原理和数据要求,分析模型在流域的适用性及尺度效应),结合 ArcGIS 和 swat 模型,对其石羊河流域生态系统的水源供给量定量评估,研究内容主要包括如下几个方面:

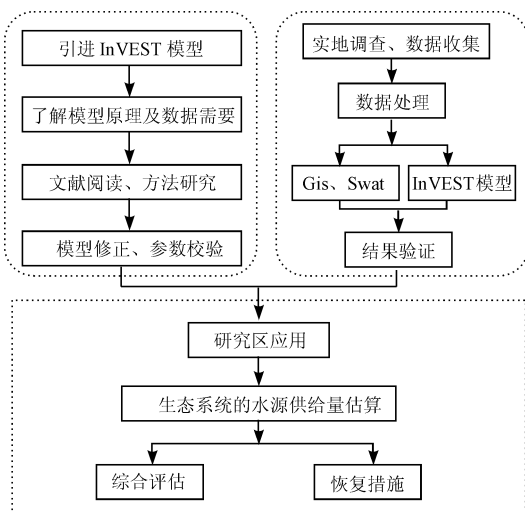


图 1 技术路线图

#### 3.2 InVEST 模型水源计算原理

InVEST 模型在 GIS 栅格图层上运行,产水模块根据水量平衡思想基于气候、地形和土地利用来计算流域每个栅格的径流量。产水量为区域上每个栅格单元的降雨量减去实际蒸发量,而降雨量与蒸发

表2 InVEST模型所需数据及格式

数据	数据项目	精度	格式	来源
空间数据	数字高程模型(DEM)	1 km	GRID	中国科学院资源环境数据中心、中国土壤数据库
	土地利用和土地覆盖变化	1:10 万	GRID/shape	
	土壤类型	1:100 万		
属性数据	土壤属性数据		DBF	《甘肃土种志》、《甘肃土壤》及流域内各县市土壤志
气象数据	降水、气温、辐射、湿度、风速、日照时数	日	DBF	中国气象局、甘肃省气象局/中国气象科学数据共享
水文资料	流量	日、月、年	DBF	甘肃省水文局

(1) 流域水文要素变化规律及变化趋势研究。流域水文要素(降水、蒸发、径流、土壤湿度等)直接影响流域生态系统水源供给功能进而影响水资源在时间、空间上的重新分配及水资源总量的改变。为此,利用常序列历史资料分析石羊河流域各水文要素演变的趋势、周期以及空间分异等特征。探讨常序列历史资料下石羊河流域降水和径流系数的变化规律及潜在蒸散发的变化趋势。

(2) InVEST模型校验及应用。整理 InVEST模型各个模块所需输入的数据类型、数据格式及参数表制作方法等;由于模型对数据类型和数据格式均有要求,为保证结果的准确性,对数据进行投影转换、裁剪、空间插值、格式转换、评估单元生成、参数表制作以及部分专家打分等一系列修正与准备工作;运行示例数据;尽管 InVEST模型在美国生态系统服务评估和应用效果均比较理想,但是中国在自然环境、社会环境等方面都与美国有着较大的差异,对于首次引进的模型不能盲目套用,必须认真了解模型原理和数据要求,分析模型在中国的适用性及尺度效应;用校验过的 InVEST模型对石羊河流域生态系统的水源供给量进行现状评估,通过对 InVEST模型方法原理分析及校验,在对模型反复验证与修正的基础上应用到石羊河流域。

(3) 不同时期流域生态系统水源供给量估算。以收集的流域大量空间数据和实测数据为基础,运用定性分析与定量研究、统计分析数值模拟相结合的方法对其空间数据和属性数据进行分析处理;基于 InVEST模型,结合gis技术和swat模型,定量估算不同时期石羊河流域生态系统的水源供给量。

(4) 诊断与分析流域水源供给量的时空变化特征及其成因。对石羊河流域生态系统水源供给量的评估,其目的是摸清石羊河流域石羊河流域生态系统水源供给服务现状,解决区域水资源供需矛盾。

深入探讨影响石羊河流域生态系统水源供给量的主要因素,分析不同因素对流域生态系统水源供给量的贡献度。对于贡献度的研究,首先要预测不同影响因素未来变化趋势,并假定影响因素作为独立的因子对水源供给量的影响,进而定量的比较主要因素间影响程度的大小。

(5) 恢复流域生态系统水源的措施。石羊河流域生态系统水源供给服务时空变化研究的最终落脚点是制定恢复水源供给量的主要技术措施。如何利用技术措施取得最佳的恢复效果是决策者最关注的焦点。因此,可通过精确的情景模拟为石羊河流域水源供给提供理论依据,具有极其重要的现实意义。

## 4 结 语

针对石羊河流域生态系统水源供给服务功能存在的问题,引用国外先进模型(InVEST模型)并首次结合Swat模型、Arcgis估算石羊河流域生态系统的水源供给量的总体思路是解决石羊河流域生态系统水源供给的新阶段,方法的初探对诊断石羊河流域水源供给服务时空变化的主要原因,精确计算石羊河流域生态系统的水源供给量,解决区域水资源供需矛盾具有重要的意义。也为石羊河流域第四轮土地利用总体规划的修编、土地利用机构的优化以及土地资源的可持续利用提供了依据。石羊河流域生态系统水源供给服务时空变化研究方法的初探,对于精确估算石羊河流域生态系统的水源供给量,进而最大潜力地挖掘水资源利用率,实现社会经济的可持续发展。以此建立起符合流域实际的最佳水资源利用与经济发展模式,为流域生态保护与建设提供科学依据,也是解决区域水资源供需矛盾最基础的工作之一。

### 参考文献:

[1] 杨园园,戴尔阜,付华. 基于 InVEST模型的生态系统服

- 务功能价值评估研究框架[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2012,33(3):41-47.
- [2] 张永民. 千年生态系统评估-生态系统与人类福祉评估框架[M]. 北京:中国环境科学出版社,2007.
- [3] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等. 基于InVEST模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. 应用生态学报,2013,24(1):183-189.
- [4] 傅伯杰,牛栋,赵士栋. 全球变化与陆地生态系统研究:回顾与展望[J]. 地球科学进展,2005,20(5):556-560.
- [5] Daily G C, Matson P A. Ecosystem services: from theory to implementation[J]. Proceedings of National Academy Sciences of the United States of America, 2008, 105(28): 9455-9456.
- [6] 李文华,张彪,谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报,2009,24(1):1-9.
- [7] 欧阳志云,郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报,2009,29(11):6183-6188.
- [8] 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.
- [9] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展,2009,24(6):571-576.
- [10] 周德成,罗格平,许文强,等. 1960-2008年阿克苏河流域生态系统服务价值动态[J]. 应用生态学报,2010,21(2):399-408.
- [11] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.
- [12] 邓坤枚,石培礼,谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J]. 资源科学,2002,24(6):68-73.
- [13] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [14] 李士美,谢高地,张彩霞,等. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究[J]. 自然资源学报,2010,25(4):585-593.
- [15] 王震洪,段昌群,侯永平,等. 植物多样性与生态系统土壤保持功能关系及其生态学意义[J]. 植物生态学报,2006,30(3):392-403.
- [16] 吴宁,卢涛,罗鹏,等. 地震对山地生态系统的影响——以5.12汶川大地震为例[J]. 生态学报,2008,28(12):5810-5819.
- [17] 徐新良,江东,庄大方,等. 汶川地震灾害核心区生态环境影响评估[J]. 生态学报,2008,28(12):5899-5908.
- [18] 李文华. 生态系统服务研究是生态系统评估的核心[J]. 资源科学,2006,28(4):1.
- [19] 谢高地,肖玉,鲁春霞. 生态系统服务研究:进展、局限和本范式[J]. 植物生态学报,2006,30(2):191-199.
- [20] Naeem S, Thompson L J. Biodiversity and plant productivity in a model assemblage of plant species[J]. Oikos, 1996, 76(2):259-264.
- [21] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability[J]. Ecology, 1996, 77: 350-363.
- [22] Zhang D Y. Research on theory ecology[M]. High Education Press, Beijing:1-100.
- [23] Chen L Z, Qian Y Q. Frontiers in biodiversity science[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17:565-572.
- [24] Zhou J Z, Ma S J. Ecosystem stability. Perspective of Modern Ecology[M]. Science Press, Beijing, 1990:54-71.
- [25] 康邵忠,栗晓玲,沈清林,等. 石羊河流域水资源利用与节水农业发展模式的战略思考[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(4):1-8.
- [26] 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.
- [27] 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+19.
- [28] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. 基于InVEST模型的海南岛氮磷营养物负荷的风险评估[J]. 热带作物学报,2013,34(9):1791-1797.
- [29] 白杨等,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.
- [30] 杨芝歌,周彬,余新晓,等. 北京山区生物多样性分析与碳储量评估[J]. 水土保持通报,2012,32(3):42-46.
- [31] 吴健生,张理卿,彭建,等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. 生态学报,2013,33(13):4125-4133.
- [32] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报,2013,33(3):726-736.
- [33] 袁志芬,黄桂林,莫宏伟,等. 四川省宝兴县生态系统生物碳储量动态评估[J]. 林业资源管理,2014(1):82-88.
- [34] 肖强,肖洋,欧阳志云,等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报,2014,34(1):216-223.
- [35] 曾建军,金彦兆,孙栋元,等. 气候变化对干旱内陆河流域水资源影响的研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):72-78.
- [36] 程玉菲,王军德,李元红,等. 基于生态需水的石羊河北部平原生态保障技术研究[J]. 冰川冻土,2014,36(3):724-731.
- [37] 王军德,李元红,李赞堂,等. 基于SWAT模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例[J]. 生态学报,2010,30(21):5875-5885.