

基于 InVEST 模型的云南小江流域生态系统碳储量及空间格局研究

陈海鹏^{1,2,3}, 窦苗^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃兰州 730070; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要 [目的]量化区域生态系统碳储量,为区域山地碳库的建立和管理,改善区域生态系统碳储量功能平衡,协调区域经济发展和生态环境保护提供科学依据。[方法]基于 InVEST 模型,利用小江流域 DEM、土地利用、土壤等数据,对该流域生态系统碳储量进行评估,分析碳储量的空间差异。[结果]小江流域生态系统总碳储量为 11.58 Mt,平均碳储量为 37.84 t/hm²,土壤碳含量较低,仅占流域总碳储量的 1/3。碳储量空间分布差异较大,流域中部地区,即昆明市东川区的碳储量较低,东南部的寻甸回族彝族自治县整体碳储量较高,就垂直梯度上,在海拔 1 800~2 900 m 生态系统碳储量功能较强,而河谷低地和高山草地碳存储的能力最弱。[结论]针对不同区域采取不同的管理措施,能有效调节小江流域碳储量的平衡,更好地促进区域内生态系统固碳功能。

关键词 小江流域;碳储量;InVEST 模型;空间差异

中图分类号 S181.6 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)12-0051-04

Study on Carbon Storage and Spatial Pattern Based on InVEST Model in Xiaojiang River Basin of Yunnan Province

CHEN Hai-peng^{1,2,3}, DOU Miao^{1,2,3} (1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Beijing 100101; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract [Objective] To quantify carbon storage in regional ecosystem not only provide effective scientific basis for establishment and management of carbon pool, but also improve the function of carbon storage in the regional ecosystem. Besides, it can also coordinate the relationship between regional economic development and ecological environmental protection. [Method] Based on the DEM, land use data and soil data, we used the InVEST model to assess the carbon storage and its distributing pattern in regional ecosystem in Xiaojiang River Basin. [Result] The results showed that the total carbon storage of the watershed was 11.58 Mt, and the average carbon storage was 37.84 t/hm². The level of soil carbon storage was relatively low, accounted for one third of the total carbon storage in Xiaojiang River Basin. The spatial distribution of carbon storage differed greatly. The value in the central region of the watershed was lower, where the Dongchuan district of Kunming City was located. The carbon storage in the Xundian Hui and Yi autonomous county in the southeast of the watershed was higher. From the vertical gradient, the carbon storage was concentrated in 1 800-2 900 m in elevation, and the lower value was in the valley and alpine meadow area. [Conclusion] The management measures should be adjusted to the different areas, which can control the carbon balance in the Xiaojiang River Basin effectively, and promote the regional carbon sequestration.

Key words Xiaojiang River Basin; Carbon storage; InVEST model; Spatial disparity

生态系统服务是人类从生态系统的结构和自然过程中所获取的惠益^[1],生态系统是人类赖以生存与发展的资源和环境基础,生态系统服务评估是生态系统服务研究最基本也是最核心的内容^[2]。在全球环境变化的背景下,陆地生态系统的格局和过程受到了极大影响,生态系统的结构和功能也随之发生较大变化,其具体的变化过程和机理仍有待研究^[3-4]。碳储量服务是一项重要的生态系统服务,随着近年来生态系统服务研究的迅速发展,碳储量服务的变化和影响机制研究也备受重视^[5]。

碳储量可以调节大气中 CO₂ 等温室气体在大气中的浓度,对于调节全球气候变化具有至关重要的作用^[6]。实际上,森林、草地及其他陆地生态系统的碳含量远远大于空气中的碳含量,碳储量的评估主要是陆地生态系统碳储量^[7-8]。近年来,国内外对生态系统碳储量功能进行了大量研究。方精云等^[9]构建了我国森林蓄积量与生物量之间的转换因子连续函数,并估算了我国森林生态系统碳储量状况;张云倩等^[10]对江苏海岸带生态系统碳储量进行了评估,并结合 ESDA (Exploratory Spatial Data Analysis) 方法研究其空间相关性及时空变异;Myeong 等^[11]基于遥感影像的时间

序列方法,采用回归方程构建了一种归一化评估模型,并对纽约锡拉丘兹地区城市林地碳储量进行评估和模拟。

小江流域作为我国干热河谷的典型流域,其气候、地质、地貌、植被类型等垂直空间差异较大^[12],生态系统碳储量功能强弱差异悬殊,加之流域内滥砍滥伐,退耕还林、化学污染等人为因素破坏,泥石流、滑坡等自然灾害的威胁,使得小江流域碳储量面临严峻的考验^[13]。笔者基于 InVEST 模型,对云南省小江流域生态系统碳储量服务进行评估和空间分析,以期政府采取合理的措施和管理方法,及时改良生态系统碳储量结构和功能提供可靠、准确的决策支持。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 小江流域(102°52'~103°22' E, 25°32'~26°35' N)为金沙江一级支流,发源于滇东北高原鱼味后山,自南向北流经云南寻甸县、东川市及会泽县境,全长 138.2 km,流域面积 3 043.45 km²^[14]。小江流域是我国典型山区之一,流域内山地面积占地区总面积的 97%^[15]。地质构造复杂,海拔高度落差悬殊,由低海拔 701 m 到高海拔 4 233 m (图 1)。

小江流域植被分布特性与土壤、气候的分布相适应,呈现垂直分带。在低海拔河谷区域,垂直向上分布着稀疏灌木草丛;中海拔山地区域,物种繁多,植被群落类型复杂,代表性的植被类型为暖性和温性的常绿阔叶与阔叶林;亚高山区,大部分植被类型为温冷性的常绿硬阔叶和针叶混交林草

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(Y5G50010A1)。
作者简介 陈海鹏(1990—),男,甘肃张掖人,硕士研究生,研究方向:生态系统服务评估及其权衡。
收稿日期 2017-03-15

类型;高山区则以高山草丛为主要植被类型^[16-17]。土地利用类型主要是草地、林地、耕地、水域、城镇用地及其他用地,其中,草地面积占全域面积的50%以上,林地在低海拔和高

海拔较为稀疏,仅10%左右,而在中海拔山地区占地面积30%~40%,耕地主要分布在中低海拔区域,面积占15%左右,城镇用地基本集中在河谷中部^[17-18]。

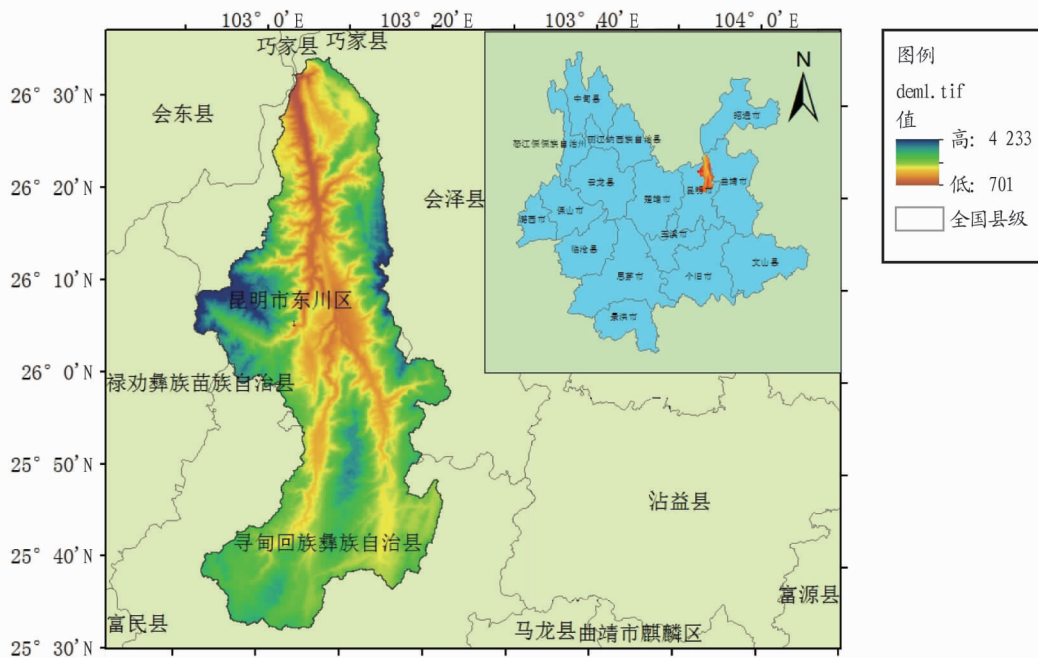


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of Xiaojiang watershed

1.2 研究方法 InVEST(The Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool)模型是由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发、免费开源、可用以量化多种生态系统服务的评估工具^[19],根据不同的模块和算法,可以模拟评估不同土地利用变化下的生态系统服务功能,如碳储量、水源涵养、材积、生境质量等^[20]。目前,InVEST模型的运用较为广泛,涉及美洲、亚洲等20余个国家和地区^[21]。

笔者运用InVEST模型碳模块来评估小江流域碳储量,InVEST模型碳储量模块认为碳储量的变化是土地利用变化的结果,简化了碳循环过程。生态系统碳库主要由4个部分组成:地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳。地上生物碳储量主要包括地上存活植被,树干、树枝、树叶等中的碳含量^[22]。基于InVEST碳储量模型的目的,暂不考虑地上碳库中极不稳定的碳,如短周期农作物等,因为该类碳相对于整个地上碳库,含量相对较少且非常稳定或更新较快^[23-24]。地下生物碳主要是活性植被根系中的碳含量,土壤碳一般被限制为矿质土壤中碳的含量,也包含有机土壤。死亡有机碳包括掉落物或者枯萎死亡的树木碳含量。模型具体运算原理如下公式:

$$C_i = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3} + C_{i4} \quad (1)$$

式中, i 表示某种土地利用类型; C_i 表示土地利用类型 i 的总碳密度(Mg/hm^2); C_{i1} 表示土地利用类型 i 地上碳密度(Mg/hm^2); C_{i2} 为土地利用类型 i 地下碳密度(Mg/hm^2); C_{i3} 为土地利用类型 i 土壤碳密度(Mg/hm^2); C_{i4} 表示土地利用

类型 i 死亡有机碳密度(t/hm^2)。

$$C_{\text{all}} = \sum_{i=1}^n C_i \times S_i \quad (2)$$

式中, S_i 为土地利用类型 i 的面积(hm^2); n 为土地利用类型的数量; C_{all} 表示总碳储量(Mg)。

模型通过ArcGIS 10.2软件得到小江流域生态系统服务碳储量地上、地下、死亡有机碳含量,通过土壤数据计算得到小江流域土壤碳储量的空间分布结果,总碳储量为两者空间叠加的结果。

1.3 数据处理 统计每一类土地利用类型的面积及碳密度数据,然后对每一类土地利用类型4个碳库的平均单位值进行赋值,再计算每一类土地利用类型的总碳储量。在所掌握的数据中,未收集到土壤碳密度数据,因此利用在野外调研过程中收集到的小江流域东川区第二次土壤普查数据,利用土壤有机碳密度与相应面积的乘积估算出土壤碳储量。事实上,地上、地下、死亡有机碳含量主要考虑植被碳储量。通过收集查阅小江流域森林资料和阅读相关文献,将植被碳密度、土地利用类型等数据输入模型,运行InVEST模型碳储量模块,输出碳储量栅格图。利用ArcGIS中的空间分析功能,把模型输出的栅格图与已有的土壤碳含量图进行相加,得到小江流域的总碳储量。

2 结果与分析

2.1 生物碳储量和土壤碳储量 图2a为模型输出地上、地下、死亡有机碳的生物碳储量结果,总碳储量为7.79 Mt,其中碳储量最大值为 $56.04 \text{ t}/\text{hm}^2$,平均碳储量为 $25.39 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。就空间分布而言,小江流域中部、河道及其周围区域的生物

碳储量较低,流域北部和东南、西南区域的生物碳储量相对较高。图 2b 为计算得到小江流域土壤碳分布,其中土壤总碳储量为 3.78 Mt,土壤碳储量最大值为 33.68 t/hm²,最小值为 3.51 t/hm²,平均土壤碳储量为 12.33 t/hm²。从土壤碳空间分布来看,小江流域靠近东部、西部边缘地区土壤碳量较低,小江河道及周边地区土壤碳含量较少,且流域从内到外的碳储量呈现逐步增长的趋势。

2.2 碳储量空间分布 空间叠加后小江流域生态系统碳储

量见图 3,流域总碳储量为 11.58 Mt,碳储量最大值为 89.72 t/hm²,最小值为 5.25 t/hm²,流域内平均碳储量为 37.84 t/hm²。从流域生态系统服务碳储量空间分布来看,小江流域小江、支流河道及其周围碳储量含量较低,而距离河道越远的大部分区域内碳储量相对较高,尤其东南局部地区含量最高。总体来说,河流上游总碳储量要远大于河流下游。就行政区、县划分来看,在昆明市东川区整体的碳储量较低,而寻甸回族自治县及会泽县域内区域碳储量较高。

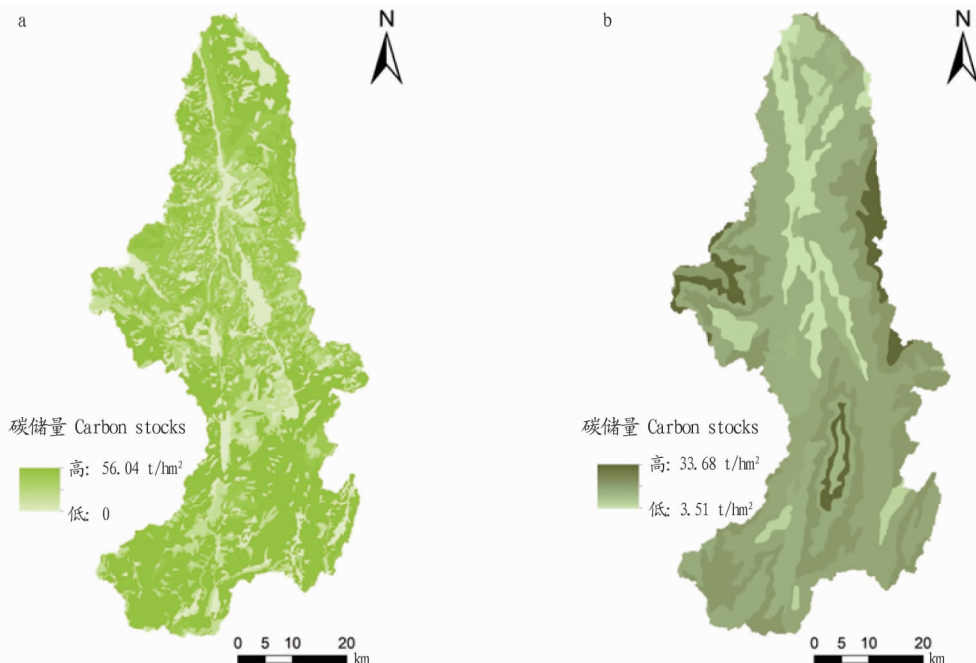


图 2 InVEST 模型输出生物碳储量(a)及土壤碳储量(b)

Fig. 2 InVEST model outputs bio-carbon reserves (a) and soil carbon stocks (b)

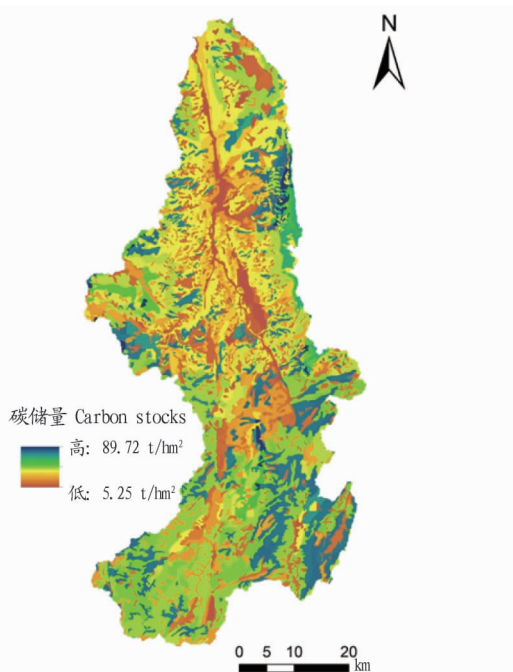


图 3 小江流域生态系统碳储量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of carbon storage in ecosystem services of Xiaojiang River Basin

2.3 碳储量垂直空间变化 由于小江流域从干热河谷低地到高山草甸区海拔垂直跨度较大,无论是气候、地貌、土地覆被等都有明显差异,生态系统垂直空间分布差异较大,为了更好地研究生态系统服务的空间垂直变化规律,笔者将研究区按照 DEM 进行垂直区域划分。区域划分是根据小江流域 DEM 数据,垂直高度上每隔 100 m 划分为 1 个子区域,海拔由低到高共计划分为 36 个子区域。将量化的生态系统服务以不同海拔高度的子域分区统计,从而找出它们之间的变化关系,同时计算了各子区域的面积,发现单位子区域面积上生态系统服务碳储量的差异更加凸显。具体变化规律如图 4 所示。从图 4 可见,从海拔 701 m 开始,子区域平均碳储量整体趋势呈先增高后降低,最高点海拔 3 100 ~ 3 200 m,平均碳储量接近 50.00 t/hm²,而子区域总碳储量也是呈先增高而后降低的变化趋势,最大碳储量接近 1.00 Mt。在海拔 2 100 ~ 3 700 m,平均碳储量高于整个流域碳储量,其他区域平均碳储量均低于流域碳储量的平均值。中海拔区域(1 800 ~ 2 900 m)的碳储量远远高于低海拔(< 1 800 m)、高海拔区域(> 2 900 m)。

3 结论与讨论

通过对小江流域碳储量评估计算结果空间分布特征和垂直空间差异进行分析,得到以下结论:①小江流域生态系

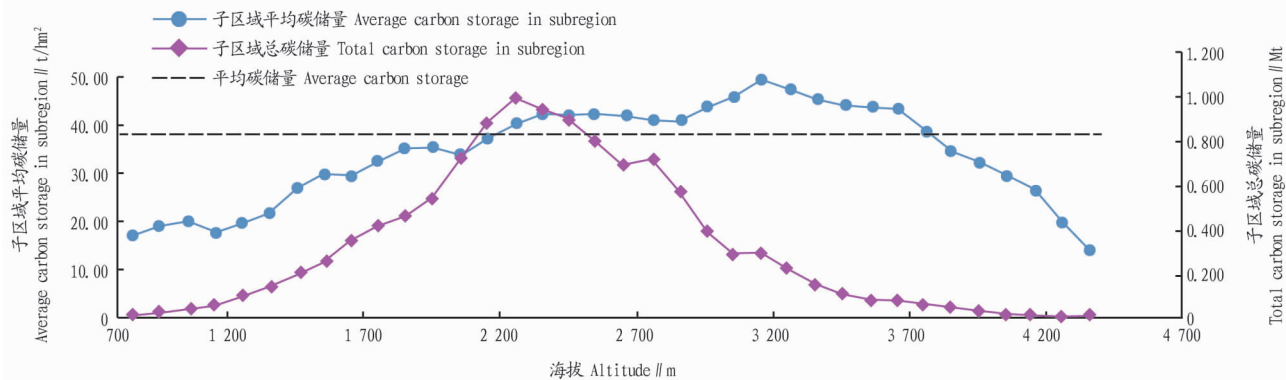


图4 小江流域生态系统碳储量垂直空间变化

Fig.4 Vertical variation of carbon storage in the Xiaojiang River basin ecosystem

统总碳储量为 11.58 Mt, 平均碳储量为 37.84 t/hm², 土壤碳含量较低, 且仅占整个流域碳储量的 1/3。②就空间分布而言, 小江流域生态系统碳储量分布差异较大, 下游中部地区, 即昆明市东川区的生态系统碳储量服务功能较弱, 流域上游尤其上游东南区域, 即寻甸回族彝族自治县大部分地区碳储量的能力较强。③从垂直梯度上来看, 小江流域生态系统碳储量高值区分布在海拔 1 800 ~ 2 900 m, 该垂直空间范围内碳储量的能力较强; 低海拔河谷地带和高海拔地区碳储量功能较弱。

生态系统碳储量主要来自生物碳含量和土壤含量, 因此, 应加大对东川区尤其是河谷地区和高海拔山地区域的生态管理, 实施退耕还林, 植树造林, 合理利用资源, 从而有效防治土壤流失。该举措不仅可以改善小江流域生态环境, 促进小江流域碳循环和生态系统固碳能力, 还能为区域碳库的建立和管理提供科学依据。

参考文献

- [1] DE GROOT R S, WILSON M A, BOUMANS R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [2] LI W H. The study of ecosystem service is the core for ecosystem evaluation[J]. *Resources science*, 2006, 28(4): 4.
- [3] 傅伯杰, 牛栋, 赵士洞. 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.
- [4] FU B J, ZHOU G Y, BAI Y F, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China[J]. *Advances in earth science*, 2009, 24(6): 571-576.
- [5] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Kanagawa: IPCC, 2006.
- [6] ZHOU D C, LUO G P, XU W Q, et al. Dynamics of ecosystem services value in Aksu River watershed in 1960-2008[J]. *Ying yong sheng tai xue bao*, 2010, 21(2): 399-408.
- [7] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [8] PAGOIA S. Payments for environmental services in Costa Rica[J]. *Eco-*

logical economics, 2007, 65(4): 712-724.

- [9] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320-2322) 的若干说明[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [10] 张云倩, 张晓洋, 陈振杰, 等. 基于 InVEST 模型的江苏海岸带生态系统碳储量时空变化研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 100-105.
- [11] MYEONG S, NOWAK D J, DUGGIN M J. A temporal analysis of urban forest carbon storage using remote sensing[J]. *Remote sensing of environment*, 2006, 101(2): 277-282.
- [12] 张广帅, 邓俊俊, 俞伟, 等. 泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析: 以云南小江流域为例[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(4): 646-654.
- [13] 谢洪, 钟敦伦, 何一平, 等. 金沙江下游云南小江流域山地灾害综合区划[J]. *山地学报*, 2007, 25(5): 622-628.
- [14] 陈循谦. 表生地质灾害与山地生态环境关系探讨: 以云南小江流域为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1992(2): 3-9.
- [15] 张桂香, 王士革. 云南东川小江流域生态环境初探及保护对策[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(5): 50-52.
- [16] 杨平恒, 高彦芳, 吴月霞. 典型岩溶流域不同地貌类型景观结构分析: 以云南小江流域为例[J]. *云南地理环境研究*, 2007, 19(4): 103-109.
- [17] 贾松伟. 基于 GIS 和 RS 的小江流域景观格局动态变化分析[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(18): 3980-3983.
- [18] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 等. 典型岩溶农业区地下水质与土地利用变化分析: 以云南小江流域为例[J]. *地理学报*, 2006, 61(5): 471-481.
- [19] POLASKY S, NELSON E, PENNINGTON D, et al. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the State of Minnesota[J]. *Environmental and resource economics*, 2011, 48(2): 219-242.
- [20] SHARP R, TALLIS H T, RICKEETS T, et al. InVEST 3.2.0 user's guide[M]. Stanford: The Natural Capital Project, 2015.
- [21] 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.
- [22] 彭台. 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[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [23] TALLIS H, RICKEETS T, GUERRY A, et al. InVEST 2.0 beta User's Guide: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs[Z]. Standard, USA: Natural Capital Project, 2011.
- [24] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.