

于桥水库流域水源供给服务的空间分布格局

孙艳伟, 李加林, 马仁锋, 李伟芳

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 空间定量评估流域生态系统水源供给服务功能对水源区可持续发展及生态补偿机制的建立具有重要意义。基于研究区土地利用数据、气象数据和土壤数据,应用 InVEST 模型评估了于桥水库流域生态系统的水源供给量,并定量分析了流域水源供给能力的空间分布格局特征。结果表明:当 Zhang 系数为 3.2 时,流域的年径流深为 161 mm,流域内年总产水量为 3.14 亿 m^3 。从空间分布格局来看,流域水源供给量存在显著的空间异质性;南部和中东部平原区单位面积水源供给量较高,水库南岸水源供给能力高于北岸;遵化市和蓟县对水源供给总量的贡献率达到 85%;流域内不同景观类型的水源供给能力由大到小的排序为:耕地 > 林地 > 人工表面 > 裸地 > 灌草地,耕地、林地和人造表面对水源供给总量的贡献率达到 82%。流域南部和中东部平原区是水源供给功能保护的重点区域,但同时也是防控城镇面源污染的关键地区。

关键词: 水源供给功能; 空间分布特征; 生态系统; 降雨量; 径流量; 土地利用类型; 于桥水库流域

中图分类号: S272.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0001-06

Style of spatial distribution of water supply service in Yuqiao watershed

SUN Yanwei, LI Jialin, MA Renfeng, LI Weifang

(School of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The quantitative assessment on spatial pattern of watershed ecosystem service and water conservation function has important significance for the sustainable development of water source areas and the establishment of ecological compensation mechanism. Based on the data of land use, meteorology and soil in the study area, the paper used InVEST model to evaluate the amount of water of ecological system in Yuqiao watershed, and quantitatively assess the spatial distribution feature of water supply ability in the whole basin. The result showed that when the Zhang coefficient is 3.2, the total water yield in the basin is 3.14 10^8 m^3 , the annual runoff depth is 161 mm/a; in the point view of spatial distribution, there is a significant spatial heterogeneity for water supply yield in the basin. The southern and eastern-central plain areas of the basin have higher water volume supply per unit area. The ability of water supply in southern shore area of Yuqiao reservoir is higher than that in the northern shore area. Zunhua city and Jixian county contributes to 85% of total water. The comparison of water conservation capacity between different types of landscape indicated that the order of water supply ability from big to small is farmland > forest > artificial surfaces > bare land > shrub grassland. Farmland, forest and artificial surface contribute to 82% of total water. Therefore, the eastern-central plain regions should be the key protected areas for water supply function and is the key area for the prevention and control of urban non-point source pollution.

Key words: water supply function; spatial distribution feature; ecosystem; rainfall; runoff; land-use; Yuqiao watershed

湿地生态系统服务是指人类从湿地生态系统中
所获得的利益,它不仅包括提供产品功能,还包括调

节功能、支持功能和文化服务功能^[1-2]。水源供给
功能是湿地生态系统服务功能的重要组成部分。地

收稿日期:2015-06-21; 修回日期:2015-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41171073、41471004)

作者简介:孙艳伟(1983-),男,内蒙古赤峰人,博士,讲师,研究方向:城市地理与资源环境规划研究。

表水资源短缺和水环境问题的加剧使得流域水源供给功能评估成为研究热点议题之一。不同类型生态系统对水源供给的能力存在差异,因而在较大空间尺度上研究水源供给功能一直是生态学和文学研究的热点和难点^[3]。国内外对生态系统水源供给服务功能评估的主要方法包括水量平衡法、土壤蓄水估算法、地下径流增长法和降雨储存法等,常用的方法是水量平衡法和降雨储存法^[4-6]。近年来,“精细化、定量化、模型化、空间化”已成为区域水源供给生态系统服务功能评估的发展方向。InVEST (The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool) 是一款广泛用于生态系统服务功能评估的模型方法,全称为生态系统服务功能综合估价和权衡得失评估模型,2007 年由美国斯坦福大学、TNC 和世界自然基金会合作联合开发。初衷是为了能够在地图上标出自然景观的价值,使自然资本更为容易地纳入决策体系,将经济因素与环境保护有机结合。自 2010 年以来,国内学者将 InVEST 模型引入我国,已成功应用于长江中下游平原、北京山区、海南岛等区域的生态系统服务价值评估研究^[6]。水源供给是一项重要的生态系统服务,水源供给服务的变化及其影响机制越来越受到广泛关注。国内部分学者借助 InVEST 模型对不同区域和不同类型生态系统的水源供给功能及其时空分布进行了大量研究,并取得了良好效果。例如,张媛媛^[7]应用 InVEST 模型对近 30 年来三江源区水源供给量整体变化趋势进行了分析。Zhang canqiang 等^[8]采用 InVEST 模型的产水量模型预测了浙江西苕溪流域的产水量。彭怡^[9]引入 InVEST 模型,探讨了模型在汶川地震灾区生态系统服务功能评估中的科学性及其在中国推广的适用性。周彬等^[10]利用 InVEST 模型中土壤侵蚀模块模拟北京山区土壤侵蚀过程,研究了不同森林类型的土壤保持能力。余新晓等^[11]应用 InVEST 模型评估了北京森林生态系统的水源供给功能。陈龙等^[12]应用 InVEST 模型对澜沧江流域的水源供给功能进行研究,对比了不同组成结构的生态系统的水源供给能力。潘韬等^[13]应用 InVEST 模型定量估算了三江源区过去 30 年的水源供给量的时空变化特征。白杨等^[14]采用 InVEST 模型,评价了白洋淀流域 7 种服务功能指标,分析了其空间分布特征。

于桥水库流域地跨河北、天津两省(直辖市),是引滦输水工程的下游地区。伴随于桥水库流域社会经济的迅速发展,生态环境资源不合理的开发利

用,导致包括水源供给功能在内的生态系统服务功能不断退化。有效的保护流域水源供给服务功能是促进流域水文循环、缓解区域性缺水及水环境污染物的的重要手段。因此,阐明于桥水库流域水源供给量的空间分布规律、划定水源供给功能重点区域等研究已迫在眉睫。本研究采用 InVEST 模型的产水量模块,模拟于桥水库流域的水源供给量及其空间分布模式,并据此划定了流域水源供给重点功能区,从而为流域尺度上的水资源管理提供定量、可视化的结果,为流域生态系统保护和生态补偿机制的制定提供基础数据支持。

1 区域概况

于桥水库流域位于蓟运河上游,自东向西跨越冀、津两省(直辖市),地理位置为东经 $117^{\circ}26' \sim 118^{\circ}12'$ 、北纬 $39^{\circ}23' \sim 40^{\circ}23'$,流域东西长 66 km,南北宽 520 km,总面积约 2 060 km²。其中河北省境内流域面积 1 636 km²,下游的天津市境内的流域面积 424 km²,约占全流域的 21%。沙河、黎河和淋河为流域内的 3 大主要汇水河流。流域内土壤类型有棕壤、褐土和潮土三大类型,在全国土壤分区中属褐土地区。于桥水库流域属温带大陆性季风型的半湿润气候,年平均气温为 $10.4 \sim 11.5^{\circ}\text{C}$,全年气温 1 月最低,最低温度为 -28.6°C ,7 月最高,最高温度为 41.2°C 。流域降水丰沛,多年平均降水量为 748.5 mm,降水的季节分配差异很大,主要集中在汛期 6-9 月,占多年平均降水量的 83.5%。

于桥水库地处燕山山脉边缘地带的州河盆地,位于天津北部蓟县城东 4 km 处,距离天津市区 115 km,是引滦入津工程重要的调蓄水库,也是天津市唯一的城市集中式饮用水水源地。2012 年于桥水库实际供水量为 4.4 亿 m³,服务总人口为 628.04 万人。近年来,由于天津市经济的高速发展,生活用户水量不断激增,而受上游来水影响入库水量呈现减小趋势,流域内水资源日益紧缺,因而水库上游地区的生态系统服务功能的维持和改善对于整个天津市的饮用水供给安全至关重要。

2 研究方法及数据处理

2.1 模型方法

依据水量平衡原理,水源供给量是平均降雨量减去平均蒸散量及其它水分损耗的剩余水量,包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水量和冠层截留等^[15]。研究利用 InVEST 中的产水量模块(Water

Yield model)对流域内不同地理单元的水源供给量进行定量评估。产水量模型建立在 Budyko 曲线和年均降雨量数据基础上,充分考虑了气候因子和水循环之间的密切关系;模型简化了汇流过程,没有区分地表径流、壤中径流和基流,并假设栅格产水量通过以上任意一种方式到达出水口;栅格产水量为流域每个栅格单元的降雨量减去实际蒸发量,而降雨量与蒸发量之间的平衡又与其它一系列的气象、土壤和地表覆盖(土地利用类型或植被覆盖类型)等环境要素密切相关;模型运算依托于 GIS 栅格运算功能。不同土地利用类型栅格单元的年均产水量 Y_{xj} 计算方法参见公式(1)~(5)^[16]:

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

式中: Y_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的产水量, mm; AET_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的年实际蒸发量, mm; P_x 为多年平均降雨量, mm。

用 Budyko 假设计算水量平衡的蒸散部分 AET_{xj}/P_x , 计算公式如下:

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

式中: R_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的无量纲 Budyko 干燥指数; ω_x 为植物有效含水量与年均降雨量的比值:

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} \times ET_{0xj}}{P_x} \quad (3)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (4)$$

式中: AWC_x 为栅格 x 的植物有效含水量, mm, 由土壤质地和土壤有效深度决定; Z 为 Zhang 系数, 反映降雨时间的分布和降雨量, 对于降水集中于冬季的区域(12月-第二年4月), Z 值趋近于 10, 而对于降水分布于全年或夏季多雨的区域, Z 值趋近于 1; k_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的植被蒸散系数; ET_{0xj} 为栅格 x 的潜在蒸散量, mm/d, 与海拔、纬度和坡度有关。 ET_0 采用 InVEST 模型推荐的 Modified - Hargreaves 法计算, 公式如下:

$$ET_0 = 0.0013 \times 0.0408RA(T_{avg} + 17)(TD - 0.0123P)^{0.76} \quad (5)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散量, mm/d; RA 为太阳大气顶层辐射, $MJ/(m^2 \cdot d)$; T_{avg} 为日最高温均值和日最低温均值的平均值, $^{\circ}C$; TD 为日最高温均值和日最低温均值的差值, $^{\circ}C$; P 为月均降水量, mm。根据

高歌等^[17]应用 Penman - Monteith 公式计算的结果, 海河流域年潜在蒸散量的多年平均值为 1 000 mm 左右, 与本研究的估算结果 1 011 mm 基本一致。

2.2 数据处理

产水量模型的输入参数包括土地利用/土地覆被数据、年均降雨量、年均潜在蒸发量、土壤深度、土壤有效含水量、流域和子流域边界以及生物物理表等。

(1) 流域边界及汇水单元划分。

在 ArcGIS9.3 平台下, 应用 ArcSWAT2009 软件, 以 SRTM DEM(分辨率 90m)数据为基础数据输入, 通过流域划分模块提取了于桥水库流域的水文特征, 划定了流域的河流水系分布, 并将流域划分为 48 个子汇流单元。

(2) 土地利用/土地覆被数据。

采用《全国生态环境十年变化(2000 - 2010)遥感调查与评估项目》全国土地利用/土地覆被栅格数据集, 应用 ArcGIS9.3 mask 工具叠加流域边界进行数据裁切, 获得研究区土地利用/土地覆被数据。

该数据集以中高分辨率多源影像为数据源, 采用决策树分析方法, 通过采用人工与自动相结合的方式, 对于影像光谱划分机理清楚的类型采用人工建树方法, 对于类型的光谱变化比较大、规律不清楚的类型采用自动方法(最邻近方法), 全国、样区尺度的土地覆盖的总体精度 > 85%。结合流域实际景观类型, 研究区土地利用类型共划分为 6 类, 分别为: 耕地、水体、人工表面、林地、灌草地及未利用土地等(图 1)。

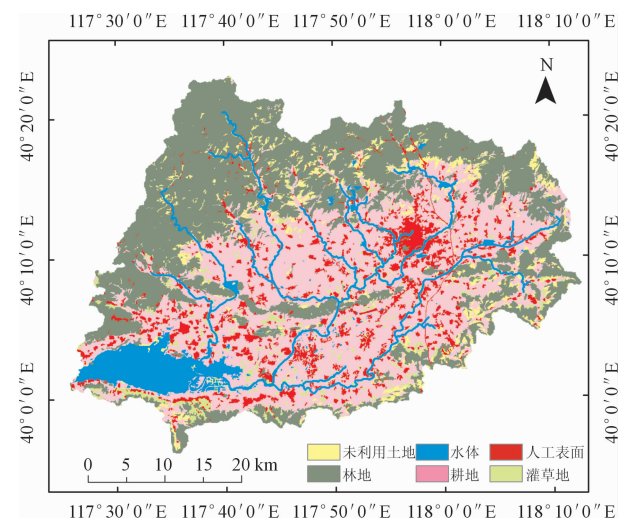


图 1 2010 年于桥水库流域土地利用图

(3) 年均降雨量数据。流域年均降雨量数据以于桥水库流域内及周边 25 个气象站 1970 - 2000 年

30 年间年均降雨量数据为基础,采用地统计学的反距离加权插值技术(IDW),对降雨数据进行空间插值,获得研究区多年平均降雨量空间分布栅格数据(图 2a)。

(4)土壤深度及土壤有效含水量。土壤厚度数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心的 1:100 万中国土壤图,通过属性空间栅格化后获得研究区土壤厚度栅格图。土壤有效含水量数据是应

用 SPAW 软件,导入沙、黏土及黏土等土壤质地的百分比含量后,计算得到每类土壤的有效含水量。

(5)生物物理表。生物物理表反映了研究区土地利用和土地覆盖类型的属性,包括土地利用编码、植被最大根深、蒸散系数等。植被最大根深数据、蒸散系数依据 InVEST 用户指南估算获得^[16]。图 2b 为潜在蒸散量的空间分布图。

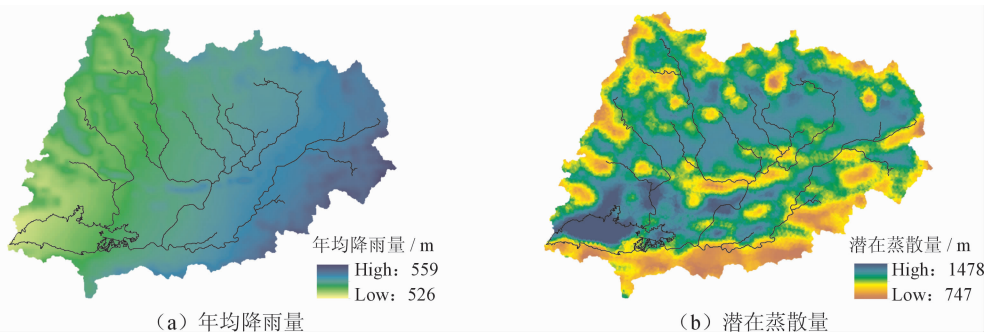


图 2 于桥水库流域年均降雨量及潜在蒸散量空间分布

3 结果与分析

3.1 模型校验

模型校验是将模型预测结果与实测数据进行比较,通过不断调整参数,以得到最适于本区域的预测模型。Sánchez - Canales 等对 InVEST 模型的输入参数进行了敏感性分析,认为水源供给量与年均降雨量、年潜在蒸散量及降雨季节分配因子有关^[18]。由于研究区地表径流量实测数据的缺失,InVEST 模型产水量的预测结果很难进行准确校验。根据 2012 年天津市水资源公报^[19],天津市蓟县多年平均径流深约为 160 mm。经过反复产水量模拟计算,当 Zhang 系数为 3.2 时,流域的年径流深为 161 mm,流域内年总产水量 3.14 亿 m^3 。

3.2 流域水源供给功能空间模拟

图 3 给出了于桥水库流域生态系统水源供给量

的空间分布。全流域生态系统多年平均水源供给量为 161 mm/a,占多年平均降雨量的 30%,水源供给总量为 3.14 亿 m^3 。水源供给量在空间上呈现出显著的异质性。从整体的空间分布格局上来看,水源供给功能较高的区域位于流域中西部的平原区,大面积的耕地和人工表面产生大量地表径流;山前开阔的平原区主要以建设用地和农业用地为主,削弱了水源的供给功能,水源供给量在流域北部深山区形成低值区,主要是由于森林生态系统蒸散量高于其他类型生态系统。其中,于桥水库南岸水源供给量明显高于北岸,说明水库南岸是防控地表径流面源污染的重点区域(图 3a)。

图 3b 给出了流域内 48 个子汇流单元的平均水源供给量。同样,水源供给高值区主要分布于中部和南部子流域,北部深山汇流区形成低值区。

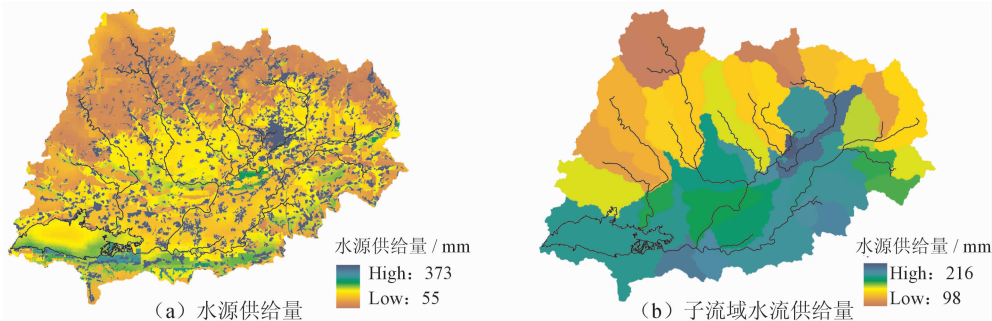


图 3 于桥水库流域水源供给量及子流域水源供给量空间分布

从行政区划单元上来看,于桥水库流域主要分布于遵化市(58%)、蓟县(22%)、兴隆县(19%);水源供给总量的贡献比例为:遵化市 63%,蓟县 22%,兴隆县 13%,其他两个县仅占 2%;平均水源供给量以玉田县最高,其次为遵化市(见表 1)。

表 1 流域内主要行政单元水源供给量统计

区县名称	所属流域 面积/km ²	水源供给 总量/亿 m ³	平均水源 供给量/mm
遵化市	1179	1.98	168
蓟 县	499	0.7	156
兴隆县	387	0.45	104
迁西县	15.8	0.03	146
玉田县	15.8	0.03	184

于桥水库流域不同生态景观类型的水源供给能力存在差异,由大到小的排序为:耕地>林地>人工表面>裸地>灌草地,耕地、林地和人造表面对水源供给总量的贡献率达到 83%(见表 2)。主要是由于单位面积林地的实际蒸散量高于其他景观类型,因而在一定的气候条件下,整个流域的水源供给量会随着林地面积比例的扩大而减少,这与李屹峰等^[20]在北京密云水库流域的研究结果一致。另外,Chisholm 等^[21]和 van Dijk^[22]等的研究也发现林地面积的扩张会明显减小河流径流量。根据统计结果,城镇/村庄等不渗透表面的水源供给能力高于其它景观类型,可能与暴雨径流期间水量的损失较少有关。

表 2 主要生态景观类型水源供给量统计

景观类型	面积/ km ²	平均水源 供给量/mm	水源供给 总量/亿 m ³	所占 比例/%
耕地	802	154	1.24	40
林地	776	95	0.73	23
人工表面	190	322	0.61	20
水体	109	150	0.16	5
未利用土地	103	272	0.28	10
灌草地	65	162	0.11	3

3.3 水源供给重要功能区划分

为了筛选出流域水源供给的重要功能区,本研究依据流域单位面积水源供给量的数据分布情况,提出了流域水源供给功能重要功能区的划分标准(见表 3),将流域 48 个子汇流单元划分为 3 个级别,分别为极重要(Ⅲ)、重要(Ⅱ)和一般重要(Ⅰ)。

表 3 流域水源供给重要功能区划分标准

单位面积水源供给量/mm	>180	180~140	<140
重要性级别	极重要	重要	一般重要

图 4 给出了于桥水库流域水源供给重要功能区的划分结果。水源供给重要性总体上与水源供给能力的空间分布格局一致;流域南部和中东部平原区属于水源供给极重要区域,主要分布于黎河上游遵化市城区及周边地区,占到流域总面积的 23%,但对水源供给总量的贡献率为 29%;于桥水库周边及沙河周边地区则属于水源供给重要区域,占到流域总面积的 41%,但对水源供给总量的贡献率为 43%;而北部山区则属于水源供给一般重要区域,占到流域总面积的 36%,但对水源供给总量的贡献率为 28%。气象因子和下垫面状况是影响流域水源供给能力的关键因素,流域内降雨是生态系统水分循环的主要来源,潜在蒸散表征区域生态系统的水分消耗能力,潜在蒸散越大,可能消耗的水分越多^[13]。对于中小尺度流域而言,下垫面状况是影响生态系统水源供给能力的关键,决定流域生态系统水源供给能力的空间分布格局。

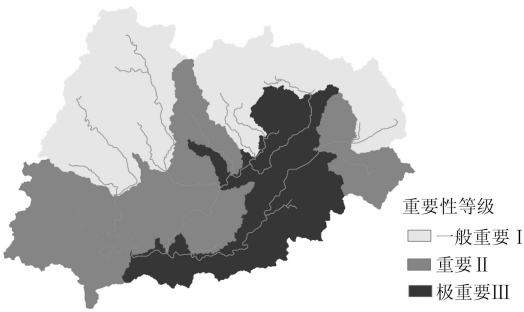


图 4 于桥水库流域水源供给重要功能区划分

4 结 语

基于 InVEST 模型的产水量模块,结合于桥水库流域土地利用、土壤、气象、DEM 等基础空间数据,对流域内水源供给功能的空间分布格局进行了探索分析,得出以下几方面的主要结论:

- (1) 于桥水库流域生态系统多年平均水源供给量为 161mm/a,占多年平均降雨量的 30%,水源供给总量为 3.14 亿 m³;而且沙河和黎河子流域的水源供给量自上游至下游呈现明显的减少趋势。
- (2) 水源供给量具有显著的空间异质性,南部和中东部平原区单位面积水源供给量较高,库区南

岸水源供给能力明显高于北岸,遵化市和蓟县对水源供给总量的贡献率达到 85%。

(3)研究区内人工表面和未利用土地等景观类型水源供给能力高于其它类型;耕地、林地和人工表面是流域水资源的主要贡献者,对水源供给总量的贡献率达到 83%。

(4)水源供给功能区的重要性级别总体上与城镇、村庄等人工表面的空间分布格局具有较好的一致性;流域南部和中东部平原区属于水源供给极重要区域,于桥水库周边则属于水源供给重要区域,而北部山区则属于水源供给一般重要区域。

总体来看,InVEST 模型在于桥水库流域具有较好的适用性,有利的促进了区域水源供给生态系统服务功能评估向“精细化、量化、模型化、空间化”的目标迈进。水源供给功能评估为流域水资源的保护和跨界生态补偿标准的制定提供了明确的科学依据。

参考文献:

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis [M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [2] 江波,欧阳志云,苗鸿,等.海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J].生态学报,2011,31(8):2236-2244.
- [3] Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, et al. Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services [M]. New York: Oxford Univ Press, 2011.
- [4] 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.
- [5] Goldsteina J H, Giorgio C, Thomas Kao D. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [6] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. InVEST 模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学,2013,33(4):58-62.
- [7] 张媛媛. 1980-2002 年三江源区水源涵养生态系统功能评估分析[D]. 北京:首都师范大学,2012.
- [8] Zhang Canqiang, Li Wenhua, Zhang Biao, et al. Water Yield of Xitaoxi River Basin Based on InVEST Modeling[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012,3(1):50-54.
- [9] 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[D]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,2010.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 陈龙,谢高地,张昌顺,等. 澜沧江流域生态系统水源涵养功能研究[J]. 资源与生态学报(英文版),2011,2(4):322-327.
- [13] 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.
- [14] 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):0711-0717.
- [15] 肖寒,欧阳志云,赵景柱,等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报,2000,11(4):481-484.
- [16] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. InVEST 2.0 Beta User's Guide [M]. Stanford: Stanford University, 2013.
- [17] 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956-2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究,2006,25(3):378-387.
- [18] Sánchez-Canales M, Benito A L, López Benito A, Pascual A, et al. Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed [J]. Science of the Total Environment, 2012,440(3):140-153.
- [19] 天津市水务局. 2012 年天津市水资源公报 (EB/OL). (2013-08-08) [2015-02-12] <http://www.tjzfxgk.gov.cn/tjep/ConInfoParticular.jsp?id=42068>.
- [20] 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):0726-0736.
- [21] Chisholm R A. Trade-offs between ecosystem services: Water and carbon in a biodiversity hotspot[J]. Ecological Economics, 2010,69(10):1973-1987.
- [22] Dijk A V, Keenan R J. Planted forests and water in perspective[J]. Forest Ecology and Management, 2007,251(1/2):1-9.