

汉江上游流域生态系统水源供给服务变化

吴丹, 邹长新, 徐德琳, 徐梦佳

(环境保护部 南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要: [目的] 研究汉江上游流域 2000—2010 年生态系统水源供给服务的时空变化及其影响因素, 为区域水资源的科学管理与政策制定提供科学依据。[方法] 基于 InVEST 模型的产水模块分析汉江上游流域生态系统的水源供给服务。[结果] 10 a 间研究区林地、湿地和人工表面面积有所增加, 耕地面积有所减少, 草地面积基本稳定。年平均植被覆盖度总体呈上升趋势, 变化率为 0.005 1/a。2000, 2005, 2010 年, 汉江上游流域平均水源供给量分别为 4.67×10^{10} , 5.22×10^{10} , 4.73×10^{10} m³。[结论] 研究区水源供给量的时空变化是气候变化和土地利用共同作用的结果; 降水增加对水源供给量增加起到一定的积极作用, 土地利用变化导致的下垫面改变及生态系统好转可能是水源供给量下降的主要驱动力。

关键词: 水源供给; InVEST 模型; 产水模块; 汉江上游流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0232-04

中图分类号: Q148

文献参数: 吴丹, 邹长新, 徐德琳, 等. 汉江上游流域生态系统水源供给服务变化[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 232-235. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.039; Wu Dan, Zou Changxin, Xu Delin, et al. Water source supply service variations of ecosystem in Upper Hanjiang basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 232-235. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.039

Water Source Supply Service Variations of Ecosystem in Upper Hanjiang Basin

WU Dan, ZOU Changxin, XU Delin, XU Mengjia

(Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing, Jiangsu 210042, China)

Abstract: [Objective] Studying the spatial-temporal variation and the influencing factors of ecosystem water source supply service in Upper Hanjiang Basin during 2000 and 2010, in order to provide basis for scientific management and policy formulation of regional water resources. [Methods] The water yield module within InVEST model was used to analyze the supply service. [Results] Forestland, wetland and construction land areas increased in the decade, while farmland area decreased. Grassland area remained stable. Annual mean vegetation coverage was in an overall rise with a gradient of 0.005 1/a. Water yields of upper Hanjiang basin in 2000, 2005 and 2010 were 46.70, 52.21 and 47.29 billion cubic meters, respectively. [Conclusion] Spatiotemporal variation of water source supply amount in the study area was a combination result of climate and land use change. Increased precipitation had a positive role in increasing water yield. Change of underlying surface caused by land use change and ecosystem improvement could be the main driving forces of the declined water supply in upper Hanjiang basin.

Keywords: water supply; InVEST model; water yield module; Upper Hanjiang basin

汉江上游流域是中国南水北调中线工程的重点取水处, 其水源供给服务对区域水循环和水量平衡具有至关重要的作用。汉江上游径流量从整体上来说呈现出较明显的减少趋势, 特别是 20 世纪 90 年代以来, 随着人类活动的加剧和全球气候变化的影响, 径

流量减少的趋势更为明显^[1-3]。研究汉江上游流域水资源的时空变化特征, 对于指导流域水资源综合利用和优化配置具有重要的现实意义。近年来, 随着生态系统服务研究的迅速发展, 学者开始通过建立模型来评估较大尺度生态系统服务的时空分异^[4-6]。2007

收稿日期: 2017-07-05

修回日期: 2017-08-17

资助项目: 环保公益性行业科研专项“重要生态功能区退化生态系统修复模式研究与应用示范”(201409055); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX170306)

第一作者: 吴丹(1988—), 女(汉族), 江苏省常州市人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态系统服务与生态安全方面的研究。E-mail: cumtwudan@163.com。

通讯作者: 邹长新(1977—), 男(汉族), 辽宁省朝阳市人, 硕士, 副研究员, 主要从事区域生态保护方面的研究。E-mail: zcxnies@163.com。

年,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 模型(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs),其设计初衷旨在进行有效的自然资源管理决策。InVEST 模型不仅能用于快速、便捷地量化和价值化单项或综合生态系统服务,并以可视化的形式表达出来,还能够解释生态系统服务的空间分异特征,从而更好地为相关部门提供管理和决策依据,协调自然和社会的利益平衡^[7-12]。本研究以 InVEST 模型分析了 2000—2010 年汉江上游流域生态系统水源供给服务的时空变化,探讨影响其变化的可能因素,旨在为区域水资源的科学管理与政策制定提供一定的科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

汉江是长江流域的最大支流之一,发源于陕西省西南部宁强县北的蟠冢山,流经陕西汉中、安康入湖北境,再经十堰、襄樊于武汉市汇入长江。干流丹江口以上为上游区,长约 925 km,集水面积约 97 400 km²,占汉江流域总面积的 56%;范围包括陕西省南部、湖北省西北部和河南省西部的一小部分。流域地处北亚热带,具有明显的季风气候特性,植被类型以常绿阔叶与落叶阔叶混交林为主。气候温和,多年平均气温 14~16 ℃;雨量充沛,多年平均降雨量 800~1 200 mm,夏季降水量约占全年总量的 70% 以上。汉江上游流域支流密布,北岸主要支流有褒河、胥水河、子午河等,多发源于秦岭山区;南岸主要支流有牧马河、任河、大道河、岚河等,多发源于大巴山区。汉江上游及其支流水量的主要来源是雨水,其次是地下水。

1.2 研究方法

1.2.1 植被覆盖度 植被覆盖度是植被投影面积在单位面积上所占的比例,是衡量地表植被状况的一个重要指标。根据像元二分模型理论,采用 2000—2010 年 MODIS 1 km 16 d 最大合成 NDVI 时间序列数据,通过以下公式估算植被覆盖度^[13-14]:

$$f_c = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (1)$$

式中: f_c ——像元内的植被覆盖度;NDVI——该像元的归一化植被指数;NDVI_{veg}——纯植被像元的 NDVI 值;NDVI_{soil}——完全无植被覆盖像元的 NDVI 值。

1.2.2 产水量 本研究采用 InVEST 模型的产水模块分析汉江上游流域生态系统的水源供给服务。产水模块基于水量平衡原理,根据水分的输入与输出确定产水量,可以直接在 ArcGIS 栅格图层上进行,

从而能够定量化和空间化区域产水量。模块简化了汇流过程,没有区分地表径流、壤中流和地下径流,而是假设栅格产水量通过以上任意一种方式到达出水口^[7]。该模型以年为时间单位,不考虑年内变化,以栅格单元为单位进行计算;模拟地表径流的时间格局不适用本模型方法。气候要素和土地覆被变化是影响区域产水量变化的 2 个主要因素,模型可以通过控制变量的方式初步分析气候变化和人类活动对区域产水量的贡献,但不能用于水文过程的解释说明。

InVEST 模型中,产水模块通过年降水量与年实际蒸散量计算区域产水量,主要算法如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad (2)$$

式中:AET(x)——栅格单元 x 的年实际蒸散量(mm); $P(x)$ ——栅格单元 x 的年降水量(mm); $Y(x)$ ——栅格单元 x 的年产水量(mm)。下同。

$$\frac{\text{AET}(x)}{P(x)} = 1 + \frac{\text{PET}(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{\text{PET}(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \quad (3)$$

式中:PET(x)——潜在蒸散量; ω ——自然气候—土壤性质的非物理参数。下同。

$$\text{PET}(x) = k_c(L_x) \cdot \text{ET}_0(x) \quad (4)$$

式中:ET₀(x)——参考作物蒸散量(mm),它由气候决定; $k_c(L_x)$ ——特定土地利用/覆被类型的植物(植被)蒸散系数,它由植被类型决定。下同。

$$\omega(x) = Z \frac{\text{AWC}(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (5)$$

式中:AWC(x)——栅格单元 x 的土壤有效含水量(mm),由土壤质地和土壤有效深度决定; Z ——Zhang 系数,代表区域降水分布及其他水文地质特征。

1.3 数据来源与处理

InVEST 模型中的产水模块需要输入的变量包括:年降水量、年潜在蒸散量、土壤深度、植物可利用水量、土地利用/覆被数据、一级流域、二级流域、植物蒸散系数、植被最大根系深度、Zhang 系数等。其中,年降水量由 ANUSPLIN 软件插值气象站点数据而成^[15];年潜在蒸散量由 FAO Penman-Monteith 公式计算^[16];土壤深度由第二次土壤普查数据插值而成;植物可利用水量由土壤质地和有机质含量计算^[17],取值位于 0~1 之间;植物蒸散系数由文献收集得到,取值位于 0~1.5 之间;植被最大根系深度由文献收集得到;一级流域和二级流域由数字高程模型(DEM)生成。Zhang 系数是表征降水特征的常数,对于总量相等的区域,降水次数越多,Zhang 系数越大。基于丹江口水库多年平均天然入库径流量(3.85 × 10¹⁰ m³)^[1]和模型模拟量对 Zhang 系数进行校验,

当 Zhang 系数为 7.3 时,模拟产水量与自然径流量最为接近,此时模拟产水量相对误差为 5.26%,INVEST 产水模块的模拟效果最优。

2 结果与分析

2.1 生态系统结构变化

汉江上游流域主要的生态系统类型为林地,其次为耕地,草地、湿地、人工表面和其他类型面积占比较小(表 1,附图 5)。2010 年林地、草地、湿地、耕地、人

工表面和其他类型的面积占比分别为 76.96%, 0.87%, 1.28%, 19.85%, 0.82% 和 0.23%。2000—2010 年时段内林地、湿地和人工表面面积有所增加,分别增加了 426.70, 170.77, 58.11 km²;耕地和其他类型面积有所减少,分别减少了 613.91, 38.26 km²;草地面积变化较小。2010 年,汉江上游流域林地平均水源供给量最高,为 3.42×10^{10} m³;耕地次之,为 1.14×10^{10} m³;草地和湿地平均水源供给量较低,分别为 4.65×10^8 m³, 5.85×10^8 m³。

表 1 汉江上游流域一级生态系统构成特征

年份	统计参数	林地	草地	湿地	耕地	人工表面	其他
2000	面积/km ²	70 594.33	805.93	1 007.48	18 928.83	694.03	254.56
	比例/%	76.50	0.87	1.09	20.51	0.75	0.28
2010	面积/km ²	71 021.03	802.50	1 178.25	18 314.93	752.14	216.30
	比例/%	76.96	0.87	1.28	19.85	0.82	0.23

2.2 生态系统质量变化

汉江上游流域 2000, 2010 年的平均植被覆盖度分别为 0.71 和 0.76, 10 a 间年平均植被覆盖度总体呈上升趋势, 变化率为 0.005 1/a(图 1)。2010 年, 汉江上游流域植被覆盖度小于 0.2 的面积比例为 0.28%, 介于 0.2~0.4 之间的面积比例为 0.44%, 介于 0.4~0.6 之间的面积比例为 3.63%, 介于 0.6~0.8 之间的面积比例为 67.59%, 植被覆盖度大于 0.8 的面积比例为 28.06%。与 2000 年相比较, 2010 年汉江上游流域植被覆盖度提升的面积占该区面积的 85.77%。从空间分布上看, 汉江上游流域西部、南部植被覆盖度高于中东部(附图 6)。

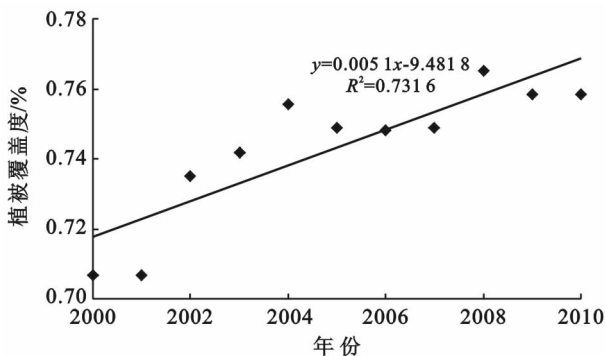


图 1 汉江上游流域 2000—2010 年年平均植被覆盖度

2.3 水源供给服务功能变化

2.3.1 降水量变化的时空差异 汉江上游流域 2000—2010 年多年平均降水量为 905.06 mm, 10 a 间年降水量总体呈轻微增加趋势(图 2)。从空间分布上看, 汉江上游流域南部地区多年平均降水量较高, 中部次之, 东北和西北部较低。

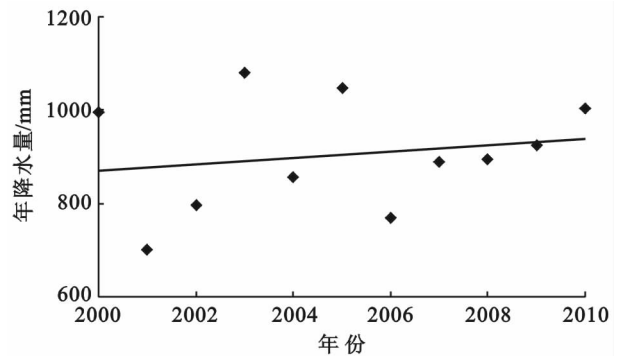


图 2 汉江上游流域 2000—2010 年年降水量

2.3.2 水源供给量变化的时空差异 2000, 2005, 2010 年, 汉江上游流域平均水源供给量分别为 4.67×10^{10} m³, 5.22×10^{10} m³, 4.73×10^{10} m³。从空间分布上看, 南部地区水源供给量普遍高于北部地区(图 3)。以 2010 年为例, 安康市、十堰市、汉中市水源供给量较高, 分别为 1.37×10^{10} m³, 1.03×10^{10} m³, 1.03×10^{10} m³。其次为商洛市和南阳市, 分别为 7.33×10^9 m³, 3.02×10^9 m³。宝鸡市、三门市水源供给量较低, 分别为 1.24×10^9 m³, 5.20×10^8 m³。

2000—2005 年, 研究区水源供给量有所上升, 增加了 5.50×10^9 m³; 2005—2010 年, 研究区水源供给量有所下降, 减少了 4.92×10^9 m³。2000—2005 年, 5 个主要城市的水源供给量均有所上升。其中, 安康市和商洛市水源供给量增加较多, 分别增加了 1.54×10^9 m³, 1.47×10^9 m³。其次为十堰市和汉中市, 分别增加了 1.10×10^9 m³, 9.32×10^8 m³。南阳市水源供给量增加最少, 为 7.70×10^8 m³。2005—2010 年, 5 个主要城市的水源供给量均有所下降。其中, 十堰

市水源供给量下降最多,为 $2.51 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。其次为安康市,下降量为 $1.56 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。商洛市、汉中市和南阳市水源供给量下降较少,分别为 $3.29 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.90 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

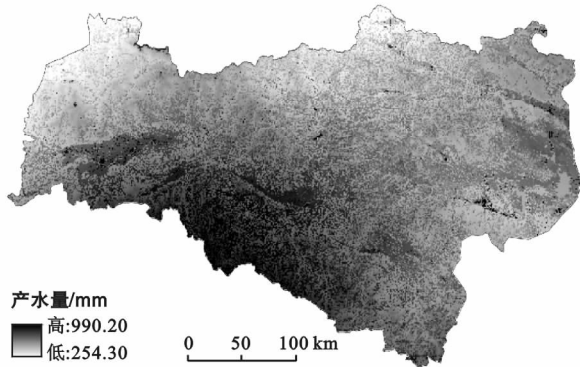


图3 汉江上游流域2010年水源供给量分布

2.3.3 影响因素分析 从水量平衡的角度而言,降水和实际蒸散是决定生态系统水源供给量的2个关键环节。降水是气候变化的重要变量,实际蒸散同时受气候和下垫面地表覆被的影响。气候变化通过影响水分供给(降水)和蒸发能力(潜在蒸散)来影响水源供给,土地利用变化通过改变下垫面状况进而影响水源供给。下垫面是水分循环的重要场所,不仅影响陆面实际蒸散发,还会影响土壤理化性质和水分状况。2000,2005,2010年,汉江上游流域的降水量先增加又下降,降水量分别为996.09,1045.92,1002.83 mm;而研究区生态系统的平均水源供给量分别为 $4.67 \times 10^{10} \text{ m}^3$, $5.22 \times 10^{10} \text{ m}^3$, $4.73 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。这两者的变化趋势基本一致,说明降水量可以直接影响水源供给量的大小。通过情景分析评估土地利用变化对水源供给服务的影响,假设气候没有发生变化,仅土地利用发生变化,即以多年平均气候和2000,2005,2010年的真实土地覆被类型输入模型,估算此种情景下的生态系统水源供给量。结果表明,平均气候状况下,2000,2005,2010年,汉江上游流域生态系统的水源供给量逐渐减少,分别为 $403.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, $402.90 \times 10^8 \text{ m}^3$, $402.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2000—2010年时段内,汉江上游流域林地面积增加了 426.70 km^2 ,湿地面积增加了 170.77 km^2 ,草地面积减少了 3.42 km^2 ;林草湿自然生态用地面积有所增加。同时,2000年,2005年,2010年研究区的平均植被覆盖度分别为0.71,0.75和0.76,10年间平均植被覆盖度总体呈上升趋势。然而,同时期的生态系统水源供给量却呈持续减少趋势。由此可见,汉江上游流域的土地利用变化和植被恢复对水源供给服务主要起负面作用。

3 讨论与结论

(1) 气候要素和土地覆被变化是影响区域水源供给量变化的2个主要因素。气候因子主要通过改变降水和潜在蒸散来影响区域水源供给量。降水是生态系统水分循环的主要来源,降水量的增加可以提高水源供给的源头水量;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。土地覆被变化通过改变下垫面状况影响实际蒸散,进而影响区域产水量。汉江上游流域生态系统水源供给量的时空变化是气候变化和土地利用共同作用的结果,降水增加对水源供给量增加起到一定的积极作用,而土地利用导致的下垫面改变及生态系统好转可能是水源供给量下降的主要驱动力。

(2) 生态系统水源供给服务是一个复杂的、受多因素影响的综合调节过程。本研究对生态系统结构、过程及其服务机理的研究较弱,在未来的工作中可以充分利用生态学和水文学的方法与成果,加强积累长期连续的定位试验与观测,将观测数据与系统模拟相结合,多因素、多尺度综合研究生态系统水源供给服务的形成、变化及影响因素,从而为生态系统服务研究提供翔实可靠的数据基础与理论支撑。

(3) 气候变化和人类活动是影响生态系统水源供给服务的两大驱动因素,如何量化区分两者对生态系统水源供给服务的相对贡献,对未来气候变化、不同土地利用方式、强度下的生态系统水源涵养服务进行模拟,从而有效指导合理的人类活动,有待进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 张洪刚,王辉,徐德龙,等. 汉江上游降水与径流变化趋势研究[J]. 长江科学院院报,2007,24(5):27-30.
- [2] 赵红莉,陈宁,蒋云钟,等. 汉江上游水资源时空演变及成因分析[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(6):90-93.
- [3] 苏雪锐,高喜永,郭亚军. 汉江上游径流时空演变规律分析[J]. 水利科技与经济,2010,16(10):1148-1151.
- [4] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, et al. Ecosystem services in decision making: Time to deliver[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009,7(1):21-28.
- [5] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2009,1162(1):265-283.
- [6] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services[J]. *Ecosystem Services*, 2013,4(1):117-125.

- 变化特征[J]. 中国农学通报, 2014, 30(33): 248-255.
- [9] 宋林, 许才万, 谢涛, 等. 贵州省退耕还林工程生态服务功能价值评估[J]. 安徽农业科学, 2014(24): 8218-8220.
- [10] 徐成立, 王雄宾, 余新晓, 等. 北京山地森林生态服务功能评估[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7): 79-82.
- [11] 国家林业局. 2014年退耕还林工程生态效益监测国家报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [12] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [13] 靳芳, 余新晓, 鲁绍伟, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [14] 余新晓, 秦永胜, 陈丽华, 等. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 783-789.
- [15] 高琼, 李月辉, 肖笃宁, 等. 沈阳市域森林生态系统服务功能价值评估[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(2): 69-72.
- [15] 范昊明, 王铁龙, 周丽丽, 等. 不同地形坡面径流流速时空分异特征研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 35-38.
- [17] 杨海军. 东北地区地表径流资源的开发利用与水土保持[J]. 东北水利水电, 1993(9): 36-39.
- [18] 周冰冰. 北京市森林资源价值[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [19] 唐克丽, 张仲子. 黄土高原水土流失与土壤退化研究初探[J]. 环境科学, 1984, 5(6): 5-8.
- [20] 金羽, 欧阳志云, 林顺坤. 海南省绿色 GDP 核算框架的初步研究[J]. 生态经济: 中文版, 2008, 1(3): 48-53, 64.
- [21] 何璐, 段曰汤, 沙毓沧, 等. 金沙江干热河谷区生态经济林复合种植模式的生态经济效益研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 16-19.
- [22] 赖亚飞, 朱清科, 张宇清. 吴旗县退耕还林生态效益价值评估[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 83-87.
- [23] 中国生物多样性国情研究报告编写组. 中国生物多样性国情研究报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [24] 张景哲, 刘启明. 北京城市气温与下垫面机构关系的时相变化[J]. 地理学报, 1988, 43(2): 159-168.
- [25] 杨琼, 陈章和, 沈鸿标. 白云山森林生态系统间接经济价值评估[J]. 生态科学, 2002, 21(1): 72-75.
- [26] 胡生君, 孙保平, 王同顺. 干热河谷区退耕还林生态效益价值评估: 以云南巧家县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(7): 78-83.

(上接第 235 页)

- [7] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. InVEST 2.0 beta User's Guide[M]. US: The Natural Capital Project, 2011.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Richter B D, Abell D, Bacha E, et al. Tapped out: how can cities secure their water future? [J] Water Policy, 2013, 15(3): 335-363.
- [12] 王雅, 蒙古军. 基于 InVEST 模型的黑河中游土地利用变化水文效应时空分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2015, 51(6): 1157-1165.
- [13] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(8): 1533-1543.
- [14] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [15] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1995, 9(4): 385-403.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO Irrigation and drainage paper No. 56[J]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998, 56(4): 97-156.
- [17] Zhou Wenzuo, Liu Gaohuan, Pan Jianjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 3-12.