

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.021

基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估

林若兰¹, 卓文珊², 高延康^{3,4}, 高艺桔^{4,5}, 符洪恩^{4,5}, 刘祖发⁵

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510611; 2. 中山大学测试中心, 广东 广州 510275;
3. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 4. 华南地区水循环与水安全广东省普通高校
重点实验室, 广东 广州 510275; 5. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082)

摘要:为评估北江流域生态径流调节效果并分析径流调节量的时空变化,基于 SWAT 模型,考虑气象、水文、下垫面等因素,模拟北江流域水文过程,分别计算 1980、2000、2015 年的植被生态系统对径流的调节量及其经济价值。结果表明:2015 年土地利用情况下,生态系统对北江流域的多年平均年调节径流深为 -141.2 mm,调节比例为 -12.2%,调节价值量为 396.2 亿元;丰水期的调节径流深为枯水期 1.8 倍,调节比例小于枯水期,而且丰水期的调节量主要集中在前汛期。流域上游的调节径流深比下游大,2000 年与 2015 年北江流域调节径流深空间分布基本一致,但由于植被覆盖减少、建设用地扩张,北江流域径流调节量减少 0.82 亿 m³,调节价值量降低 5.85 亿元。

关键词:径流调节;生态系统;SWAT 模型;北江流域

中图分类号:TV121;X43 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)06-0131-06

Assessment of ecohydrological regulation service in the Beijiang River Basin based on SWAT model// LIN Ruolan¹, ZHUO Wenshan², GAO Yankang^{3,4}, GAO Yijie^{4,5}, FU Hongen^{4,5}, LIU Zufa⁵ (1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510611, China; 2. Instrumental Analysis & Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Guangzhou 510275, China; 5. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: To evaluate ecological runoff regulation in Beijiang River Basin and analyze the temporal and spatial changes of runoff regulation amount, the hydrological process of the basin was simulated based on SWAT model, considering meteorological, hydrological, underlying surface factors, etc. The runoff regulation amount and its economic value were calculated under the condition of vegetation ecosystem in 1980, 2000 and 2015. The results show that in the 2015 land use scenario, the average annual regulative runoff depth of the ecosystem in the basin was -141.2 mm which was worth 39.62 billion yuan, and the regulative ratio was -12.2%. Under the regulation of Ecosystem, the change of runoff depth in the flood season was 1.8 times of that in the dry season but the regulative proportion in the flood season was smaller. In the flood season, the regulative amount of runoff was mainly concentrated in the pre-rainy season. The regulation of runoff in the upper reaches of the basin was larger than that in the lower reaches. In the 2000 and 2015 land use scenarios, the spatial distribution of regulative runoff depth in the basin were basically the same. But due to the reduction of vegetation coverage and increase of construction land, the regulative amount of runoff in the basin decreased by 0.82 billion m³ and the regulation value decreased by 0.585 billion yuan.

Key words: runoff regulation; ecosystem; SWAT model; Beijiang River Basin

水文调节是生态系统水文服务的重要内容。生态系统的水文调节服务可理解为生态系统对自然界中水的各种运动变化所发挥的作用,从而使水在时

间、空间、数量等方面发生变化的现象和过程^[1-2]。目前有较多学者对森林、湿地等生态系统和不同景观格局的水文调节过程、机理进行研究^[3-7]或对其生

基金项目:国家自然科学基金(41301627);中国气象局气候变化专项(CCSF201715)

作者简介:林若兰(1994—),女,助理工程师,硕士,主要从事水文规划研究。E-mail: linrl5@mail2.sysu.edu.cn

通信作者:刘祖发,副教授。E-mail: eeslzf@sysu.edu.cn

态服务价值进行评估^[8-13]。水文调节量的计算方法主要有实地试验法、经验估算法和水文模型模拟法。实地试验法由于采样数据有限,只适用于小尺度范围,在尺度外推时存在较多问题。经验估算法包括降水储存量法、多因子回归法、综合蓄水量法等^[14],但由于气象、水文、下垫面条件的空间异质性以及水量输移和转化极其复杂,经验估算法的结果往往较为粗略。随着遥感、地理信息系统、雷达测雨和计算机等技术的发展,分布式水文模型在生态学领域得到广泛应用。夏瑞等^[15]通过 DTVGM 模型对武夷山市各行政区植被生态系统的径流调节量及其价值量进行了评估;孙倩莹等^[16]应用 SWAT 模型评估厦门市不同时间的土地利用下的生态水文调节服务;黄清华等^[17]在对 SWAT 分布式水文模型改进的基础上,对黑河干流山区流域出山径流进行了模拟;Morán-Tejeda 等^[18]分别用 SWAT 模型和 RHESSys 模型对生态系统变化情景下的水文过程进行模拟。

北江流域是典型的洪涝灾害高发区^[19],历史上特大、较大洪水时有发生,生态系统的径流调节对于防洪安全具有重要意义。本文基于 SWAT 模型,分析土地利用变化背景下北江流域生态系统径流调节服务的时空变化,以期为制定合理科学的生态系统保护政策提供参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

北江是珠江的第二大水系,主要支流有武江、潞江、连江、绥江等,流域面积为 3.9 万 km²(以石角站为流域出口站点),大部分面积位于广东省内,小部分面积在湖南省、江西省。流域气候主要为亚热带季风气候,年降水量在 1 300 ~ 2 400 mm 之间,地形主要为山地和丘陵,地势北高南低(图 1),土地利用

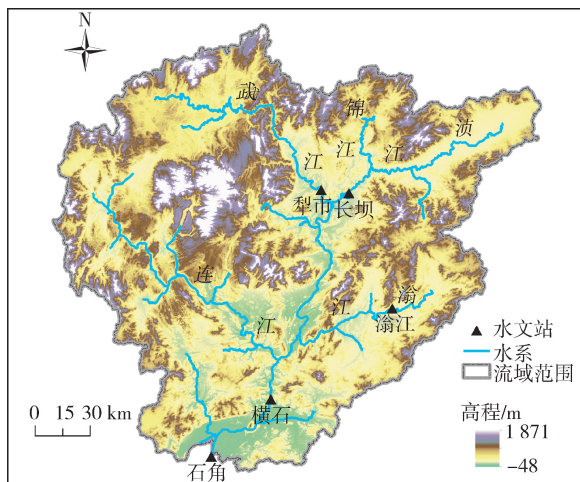


图 1 北江流域水系及范围

Fig. 1 River system and boundaries of Beijiang River Basin

类型主要为林地、耕地、草地等。流域内有北江大堤、飞来峡水利枢纽、乐昌峡水利枢纽等重要水利工程。

1.2 数据来源

收集地理空间数据云平台 90 m × 90 m 的 DEM 数据,联合国农粮组织和维也纳国际应用系统研究所于 2009 年发布的 HWSO 数据库的 1 km 分辨率土壤数据,以 Landsat 系列遥感影像为数据源的 1980 年、2000 年、2015 年的 30 m × 30 m 土地利用数据,中国气象共享网的 1975—2015 年的气象数据(包括降雨、气温、相对湿度、风速等)。此外收集来源于水文年鉴的 1980—2010 年的流域内水文站逐日径流数据,包括石角站、犁市站、长坝站、潞江站、横石站,部分站点序列不能达到 2010 年,利用插值法补齐。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

2.1.1 模型构建

根据 DEM 生成的水系划分子流域,子流域数量不同径流模拟效果不同,本研究划分 56 个子流域以取得较佳模拟效果。为考虑水利工程的影响,在飞来峡大坝的位置自定义添加子流域出口点,并设置为水库。建立土壤属性数据库,根据土地利用数据、土壤类型数据、坡度数据划分水文响应单元(HRU)。根据历史气象数据建立天气发生器以填补气候数据缺值,输入实测降雨、气温、辐射、相对湿度、风速的逐日数据。添加水库特性参数,包括水库开始运行的年月、水库特征水位对应的水面面积及库容、水库的日出流量等。设置模型计算时间步长为 1 d,将 1975—1979 年作为预热期,1980—1998 年为模型率定期,1999—2010 年为模型验证期。利用实测径流数据进行参数率定和模型验证,采用百分比偏差(P)、均方根误差与标准差比值(R)和纳什效率系数(N)评价模型的模拟效果。

2.1.2 模型率定和验证

率定参数时主要的敏感性参数为径流曲线数、浅层地下水再蒸发系数、土层的有效含水量等^[20]。不断调整参数,先率定上游的子流域,再率定下游子流域(从犁市站、长坝站、潞江站到横石站,最后到石角站)。其中,子流域水文站的验证期模拟效果为: $P < 8.02\%$, $R > 0.42$, $N > 0.75$ 。流域控制站石角站的径流量模拟结果见图 2,率定期 $P = 2.10\%$, $R = 0.33$, $N = 0.90$;验证期 $P = 1.61\%$, $R = 0.29$, $N = 0.91$,模拟效果很好。模拟的基流值和实测值基本吻合,部分年份的径流峰值未达到,峰值、谷值出现时间基本吻合,总体模拟效果较好,表明 SWAT 模型能够应用于北江流域长时间尺度的径流模拟。

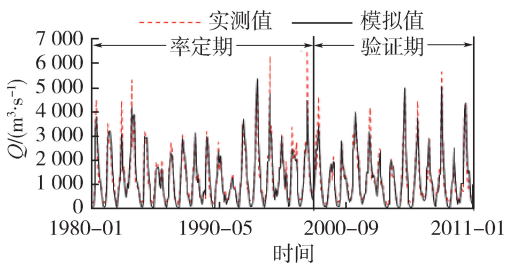


图2 石角站月径流量的模拟和实测值

Fig. 2 Simulated and measured values of monthly runoff in Shijiao Station

2.1.3 模拟情景设置

为定量研究土地利用变化对径流变化的贡献量,基于1980—2015年气象数据,利用SWAT模型对6种情景(实际土地利用的1980年(情景1)、2000年(情景2)、2015年(情景3);土地极度退化的1980年(情景4)、2000年(情景5)和2015年(情景6))进行模拟。以情景1为背景条件,分析不同时期的土地利用变化对北江流域的影响。为评估北江流域生态系统的径流调节能力,设置极度退化裸露无植被情景,将北江流域林地、灌木、草地、耕地这些有植被的土地利用类型替换为裸地,然后将实际土地利用情景和极度退化情境下的水文通量进行对比,得到生态系统对各水文通量的调节量。

2.2 土地利用变化

为定量反映不同土地利用类型之间的转化方向,计算土地转移矩阵,表达式为

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n 为土地利用类型数目; $S_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 为第*i*种土地利用类型转化为第*j*种土地利用类型的面积。

2.3 径流调节价值量评估

利用SWAT模型计算北江流域的径流调节量,采用替代工程法,以水库建设成本来定量计算生态系统径流调节的价值量^[21]:

$$E = WC \quad (2)$$

式中: E 为流域生态系统径流调节的价值量; W 为流域内的径流调节量; C 为水库建设成本,根据LYT 1721—2008《森林生态系统服务功能评估规范》,2005年水库建设成本为6.11元/ m^3 ,通过消费价格指数推算到2015年水库建设成本为7.19元/ m^3 。

3 结果分析

3.1 径流调节量的时间分布特征

利用SWAT模型对实际土地利用的情景3和土

地极度退化的情景6进行模拟,分别计算2015年实际径流深和潜在径流深,推求2015年北江流域的生态系统调节径流深。北江流域降水丰沛,降水量(多年平均值为1727.7mm)远大于流域生态系统的径流调节能力,因此流域降水量越大,年均调节径流深比例(径流深调节量与实际土地利用情景下的径流深之比)越小。生态系统对北江流域的多年平均年调节径流深为-141.2mm,调节比例为-12.2%;丰水期(4—9月)调节径流深为-90.6mm,调节比例为-10.1%;枯水期(10—3月)调节径流深为-50.6mm,调节比例为-19.4%,丰水期的调节量大于枯水期,调节比例小于枯水期。

如表1所示,在实际土地利用情景3下,地表径流全年调节量为-472.8mm,且丰水期调节径流深大于枯水期,前汛期的调节量大于后汛期。而向浅层含水层的渗透量增加,其全年调节量为282.8mm,从而使基流增加,丰水期由于降水充足,渗透量比枯水期大。另外,植被的覆盖对侧向流有直接影响^[22-23],使侧向流全年增加62.8mm,其中前汛期的增加量最大。在情景3下流域全年蒸散发量增加126.8mm,主要是由于植物蒸散发量增大,增加量主要分布在丰水期,枯水期蒸散发量变化幅度很小。

表1 生态系统调节径流深的年内分布(情景3)

Table 1 Annual distribution of hydrological fluxes regulated by ecosystem in scene 3 mm

月份	潜在径流深	实际径流深	调节径流深	各项水文通量的调节深度			
				地表径流	侧向流	向浅层含水层的渗透量	蒸散发
1	31.0	22.1	-9.0	-14.7	1.8	6.7	-2.1
2	47.3	32.3	-15.1	-22.5	2.5	13.3	-1.6
3	96.8	71.1	-25.7	-42.1	5.5	32.9	-1.2
4	152.0	121.8	-30.2	-63.6	9.6	51.6	4.3
5	198.7	166.3	-32.4	-82.5	11.3	56.6	15.4
6	217.5	188.3	-29.2	-87.8	12.3	56.0	24.1
7	147.6	148.5	0.9	-55.0	7.6	28.0	30.6
8	104.5	105.7	1.2	-41.1	4.6	16.4	21.2
9	73.6	72.6	-0.9	-29.7	3.4	10.9	19.6
10	39.0	42.6	3.6	-13.9	1.8	3.7	13.6
11	27.6	25.1	-2.5	-12.2	1.5	3.6	2.6
12	18.6	16.6	-2.0	-7.7	1.1	3.0	0.5
总计	1154.3	1013.1	-141.2	-472.8	62.8	282.8	126.8

总体而言,生态系统对下垫面起减流作用,尤其是前汛期调节径流深最大,但在后汛期调节径流深很小。这是由于在充足的降水下,森林、灌木、草地等生态系统使更多的降水转化为土壤水和地下水,前汛期土壤含水量逐渐增加,到了后汛期发生降雨时土壤孔隙较快蓄满达到饱和,产生地表径流,因此与前汛期相比,后汛期植被对地表径流的调节作用较小,前汛期的地表径流的调节径流深是后汛期的

1.9 倍。另外植被覆盖使地下径流和侧向流增加,因此植被覆盖对后汛期的总径流深影响不大。北江流域多年平均的调节径流深为 141.2 mm,转换为水量即 55.1 亿 m^3 ,推算到 2015 年生态系统的调节价值量为 396.2 亿元。

3.2 径流调节量的空间分布

SWAT 模型是分布式水文模型,全面考虑降雨和下垫面空间不均匀性。利用模型模拟情景 3 和情景 6 条件下的径流量,其差值为生态系统径流调节量,转化为生态系统调节径流深,结果如图 3 所示。

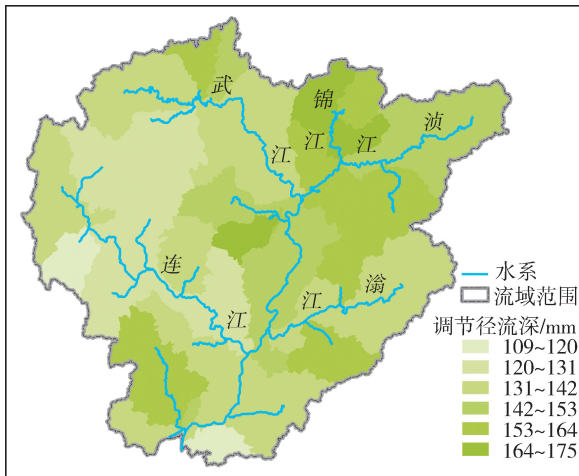


图 3 北江流域生态调节径流深的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of runoff depth regulated by ecosystem in Beijiang River Basin

北江干流上游的调节径流深比下游大,上游支流锦江、浚江、武江流域调节径流深分别为 -168.0 mm、-148.5 mm、-139.7 mm(各子流域按面积加权平均);中下游的连江、渝江流域的调节径流深相对较小,分别为 -130.5 mm、-141.4 mm;到下游干流调节径流深减小,但滨江流域的调节径流深较大,为 -155.9 mm。影响水文调节服务的主要因素包括:自然植被面积比例、农田面积比例等^[24-25]。分析北江流域 56 个子流域调节径流深与森林覆盖率(林地+灌木林)的相关性,相关系数达到 0.92,通过 0.01 的显著性水平检验;调节径流深与自然植被覆盖率(林地+灌木林+草地)的相关

系数为 0.84,通过 0.01 的显著性水平检验。表明自然植被(尤其是树林)对径流调节服务起正向促进作用,即自然植被覆盖率越大的子流域,其调节径流深越大,生态系统径流调节能力越强。而调节径流深与耕地面积比例的相关系数为 -0.45,通过 0.01 的显著性水平检验,耕地面积比与调节径流深呈负相关关系。

3.3 土地利用变化对径流调节价值量的影响

1980—2015 年北江流域的主要土地利用类型为林地,面积占比超过 62%,其次为耕地、草地,面积占比分别超过 20%、6%。从时间上来看,流域的土地利用变化可分为两个阶段:1980—2000 年和 2000—2015 年。1980—2000 年,各土地利用类型面积的年变化率较小,总体变化幅度较小,除了草地面积占比减少 0.16% 以外(转变成林地、耕地、灌木),其他各类型的面积占比变化率均不超过 0.10%。2000 年后,各土地利用类型的平均年变化率明显增大,其中耕地面积的减少速度是上一时段的 15 倍,而建设用地面积的增加速度是上一时段的 23 倍。2015 年耕地、林地、灌木、草地面积占比与 2000 年相比分别降低 0.74%、0.18%、0.17%、0.02%,水域和建设用地面积占比分别上升 0.12%、0.98%,2015 年建设用地面积是 2000 年的 1.63 倍。

总体而言,1980—2000 年的土地利用变化幅度不大,因此仅列出 2000—2015 年的土地转移矩阵(表 2)。减少的耕地面积主要是变成林地和建设用地,分别占原本耕地面积的 3.34%、3.01%;减少的林地面积主要是变成耕地、草地和建设用地,分别占原本耕地面积的 0.92%、0.68%、0.54%;减少的灌木面积主要是变成林地,占原本灌木面积的 3.61%。耕地、林地、灌木、草地分别减少 280.1 km^2 、76.3 km^2 、64.5 km^2 、10.8 km^2 ,水域面积、建设用地分别增加了 47.4 km^2 、384.3 km^2 。整体表现为耕地减少,植被覆盖减少,建设用地增加。

由表 3 可知,北江流域 2000 年生态系统径流调节量的空间分布与 2015 年基本一致。2000 年径流调节量为 55.92 亿 m^3 ,北江流域植被面积的减少以

表 2 2000—2015 年北江流域的土地转移矩阵

Table 2 Land use transition matrix of Beijiang River Basin from 2000 to 2015

土地利用类型	耕地	林地	灌木林	草地	水域	建设用地	裸地	总计
耕地	7390.0	268.1	48.7	33.3	45.5	242.0	0.1	8027.7
林地	224.8	23863.3	57.5	166.6	33.3	133.1	0.2	24478.7
灌木林	45.7	100.4	2591.0	20.1	3.3	23.7	0.1	2784.3
草地	32.0	152.1	18.2	2325.2	3.8	31.9	0.0	2563.2
水域	18.7	10.5	2.1	5.0	461.8	8.9	0.0	507.0
建设用地	36.2	8.0	2.3	2.3	6.7	545.3	0.0	600.8
裸地	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.9	1.3
总计	7747.6	24402.4	2719.8	2552.4	554.4	985.1	1.3	38963.1

及建设用地的扩张在一定程度上降低了径流调节量,到2015年调节量降低为55.10亿 m^3 ,减少0.82亿 m^3 ,调节价值量降低5.85亿元。除滨江流域外,其他北江支流流域的径流调节量均有所减小,连江流域的减少量最大,为0.16亿 m^3 ,调节价值量降低1.15亿元;锦江流域调节量变化最小,减少了0.01亿 m^3 ,调节价值量降低0.07亿元。

表3 2000—2015年各子流域径流调节量及调节价值量的变化

Table 3 Change of runoff regulation amounts and their economic value in different sub basins from 2000 to 2015

子流域	径流调节量/亿 m^3			调节价值量 变化/亿元
	2000年	2015年	变化量	
浈江	6.23	6.19	-0.04	-0.30
锦江	3.22	3.21	-0.01	-0.07
武江	10.04	9.95	-0.09	-0.68
潏江	6.87	6.82	-0.05	-0.33
连江	13.37	13.21	-0.16	-1.15
滨江	3.04	3.06	0.02	0.11
其余	13.15	12.67	-0.48	-3.43
总计	55.92	55.10	-0.82	-5.85

4 结论

a. 1980—2000年的土地利用变化幅度不大,2000年以后土地利用年变化率明显增大,耕地面积减少280.1 km^2 ,植被覆盖面积减少151.6 km^2 ,建设用地增加384.3 km^2 。

b. 2015年生态系统对北江流域的多年平均年调节径流深为-141.2mm,调节比例为-12.2%,调节价值量为396.2亿元。在生态系统的调节作用下,全年的地表径流减少472.8mm,但侧向流增加62.8mm,向浅层含水层的渗透量增加282.8mm,因此地下径流增加,蒸散发增加126.8mm,丰水期调节量大于枯水期,丰水期调节比例小于枯水期,而丰水期的调节量主要集中在前汛期。

c. 从空间分布来看,2015年北江干流上游的调节径流深比下游大,自然植被对径流调节服务起正向促进作用,尤其是树林,而耕地面积比例与调节径流深呈负相关关系。

d. 由于土地利用变化幅度整体较小,2000年与2015年北江流域调节径流深空间分布基本一致,2015年调节量减少0.82亿 m^3 ,调节价值量降低5.85亿元。

参考文献:

[1] 吕一河,胡健,孙飞翔,等. 水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. 生态学报,2015,35(15):5191-5196. (LYU Yihe, HU Jian, SUN Feixiang, et al. Water retention and hydrological regulation: harmony

but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services terrestrial hydrological ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (15): 5191-5196. (in Chinese))

[2] 赵娜娜,王贺年,张贝贝,等. 若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源保护,2019,35(5):40-47. (ZHAO Nana, WANG Henian, ZHANG Beibei, et al. Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 40-47. (in Chinese))

[3] 余新晓,史宇,王贺年,等. 森林生态系统水文过程与功能[M]. 北京:科学出版社,2013.

[4] CHANG S C, MATZNER E. The effect of beech stemflow on spatial patterns of soil solution chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand [J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 135-144.

[5] 肖笃宁,裴铁凡,赵羿. 辽河三角洲湿地景观的水文调节与防洪功能[J]. 湿地科学, 2003, 1(1): 21-25. (XIAO Duning, PEI Tiefan, ZHAO Yi. Hydrological adjustment and flooding control of wetlands in the Liaohedelta [J]. Wetland Science, 2003, 1(1): 21-25. (in Chinese))

[6] 黄青. 塔里木河中游景观格局与生态水文过程的耦合分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 83-87. (HUANG Qing. Coupling relations between landscape pattern and eco-hydrology process in the middle reaches of Tarim River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(9): 83-87. (in Chinese))

[7] 卢明星,徐传红,朱咏莉,等. Cd诱导土壤ALP的Hormesis效应:土地利用变化的驱动机制[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(2): 173-180. (LU Mingxing, XU Chuanhong, ZHU Yongli, et al. Hormetic effect of Cd on soil alkaline phosphatase: driving mechanism of land use change [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(2): 173-180. (in Chinese))

[8] 童晨,童亿勤,李加林,等. 舟山群岛景观格局变化对生态系统服务价值的影响[J]. 海洋学研究, 2019, 37(1): 40-51. (TONG Chen, TONG Yiqin, LI Jalin, et al. The effects of landscape pattern change on ecosystem service values in Zhoushan Archipelago [J]. Journal of Marine Sciences, 2019, 37(1): 40-51. (in Chinese))

[9] 巩杰,降同昌,谢余初,等. 民勤红崖山水库生态系统服务功能的经济价值[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 82-86. (GONG Jie, JIANG Tongchang, XIE Yuchu, et al. Economic value of ecosystem services of Hongyashan Reservoir in Minqin County, an arid area of China [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 82-86. (in Chinese))

[10] 马琼芳,燕红,李伟,等. 吉林省湿地生态系统服务价值评估[J]. 水利经济, 2019, 37(3): 67-71. (MA

- Qiongfang, YAN Hong, LI Wei, et al. Evaluation of wetland ecosystem services in Jilin Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(3): 67-71. (in Chinese))
- [11] 陈睿哲, 马骏. 骆马湖湿地生态服务功能价值评估研究[J]. 水利经济, 2018, 36(6): 62-65. (CHEN Ruizhe, MA Jun. Evaluation of values of ecosystem services in wetland of Luoma Lake [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6): 62-65. (in Chinese))
- [12] 王在校, 潘韬, 张玉虎, 等. 西藏自治区湿地生态系统服务功能损益核算[J]. 水资源保护, 2017, 33(增刊1): 159-162. (WANG Zaixiao, PAN Tao, ZHANG Yuhu, et al. The profit and loss about ecosystem service value of wetland ecosystem in Tibetan Autonomous [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(Sup 1): 159-162. (in Chinese))
- [13] 蒋劭妍, 曹牧, 汤臣栋, 等. 基于 CVM 的崇明东滩湿地非使用价值评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 21-27. (JIANG Shaoyan, CAO Mu, TANG Chendong, et al. Non-use value assessment of the Chongming Dongtan wetland based on the contingent valuation method [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41(1): 21-27. (in Chinese))
- [14] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030. (WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al. Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1019-1030. (in Chinese))
- [15] 夏瑞, 张远, 杨辰, 等. 基于分布式水文模型的武夷山市水文调节服务评估[J]. 环境科学研究, 2019, 32(6): 1033-1042. (XIA Rui, ZHANG Yuan, YANG Chen, et al. Hydrological adjusting service function and value assessment in Wuyishan City based on distributed hydrological model [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(6): 1033-1042. (in Chinese))
- [16] 孙倩莹, 高艳妮, 张林波, 等. 基于土地利用的厦门市生态水文调节服务评估[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 66-73. (SUN Qianying, GAO Yanni, ZHANG Linbo, et al. Assessment of ecological and hydrological regulation service of land use in Xiamen City [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 66-73. (in Chinese))
- [17] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 22-26. (HUANG Qinghua, ZHANG Wanchang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River basin, China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2004, 28(2): 22-26. (in Chinese))
- [18] MORÁN-TEJEDA E, ZABALZA J, RAHMAN K, et al. Hydrological impacts of climate and land-use changes in a mountain watershed: uncertainty estimation based on model comparison [J]. Ecohydrology, 2015(8): 1396-1416.
- [19] 赖成光, 王兆礼, 宋海娟. 基于 BP 神经网络的北江流域洪灾风险评价[J]. 水电能源科学, 2011, 29(3): 57-59. (LAI Chengguang, WANG Zhaoli, SONG Haijuan. Risk assessment of flood hazard in Beijiang River Basin based on BP neural network [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(3): 57-59. (in Chinese))
- [20] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [21] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761. (OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al. Gross ecosystem product: concept, accounting framework and case study [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6747-6761. (in Chinese))
- [22] 刘泉, 李占斌, 李鹏, 等. 汉江水源区自然降雨过程下坡地壤中流对硝态氮流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 1-5. (LIU Quan, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Effects of Nitrate-N loss by subsurface flow of slope land under natural rainfall processes in Hanjiang River water source area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 1-5. (in Chinese))
- [23] 刘慧, 白音包力皋. 植被物候模型研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 23-29. (LIU Hui, Baiyinbaoligao. Overview on the research of vegetation phenological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 23-29. (in Chinese))
- [24] 廖文婷, 邓红兵, 李若男, 等. 长江流域生态系统水文调节服务空间特征及影响因素: 基于子流域尺度分析[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 412-420. (LIAO Wenting, DENG Hongbing, LI Ruonan, et al. Spatial patterns of ecosystem hydrological regulation services and factors affecting them in the Yangtze River Basin: sub-watershed scale analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 412-420. (in Chinese))
- [25] 程俊翔, 徐力刚, 姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 24-32. (CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 24-32. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-10-01 编辑: 王芳)