

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.03.003

不同土地利用/覆盖类型下海南岛产水量空间分布模拟

吴哲^{1,2,3}, 陈歆^{1,2}, 刘贝贝^{1,2}, 初金凤⁴, 彭黎旭¹

(1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南 海口 571101;

2. 中国热带农业科学院环境影响评价与风险分析研究中心, 海南 海口 571101;

3. 海南大学环境与植物保护学院, 海南 海口 570228; 4. 河北工程大学城市建设学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 设定3种不同的情境, 应用InVEST模型, 利用水量平衡原理模拟土地利用/覆盖类型变化下海南岛产水量的空间分布。结果表明: 海南岛年均产水深可达979.04 mm; 其中中部地区产水量最高, 西部地区产水量最低; 当林地面积逐渐减少、城市建成区面积增长1倍时, 产水量的增加量最大, 年均产水深可达1004.06 mm; 当耕地面积逐渐减少、城市和建成区面积增长1倍时, 年均产水深则为1002.22 mm。

关键词: 产水量; InVEST模型; 土地利用/覆盖; 海南岛

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2014)03-0009-05

Simulation of spatial distribution of water yield of Hainan Island with different types of land use/land cover

WU Zhe^{1,2,3}, CHEN Xin^{1,2}, LIU Beibei^{1,2}, CHU Jinfeng⁴, PENG Lixu¹

(1. *Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China;*

2. *Environmental Assessment and Risk Analysis Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China;*

3. *College of Environment and Plant Protection, Hainan University, Haikou 570228, China;*

4. *School of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)*

Abstract: In this study, the InVEST model was used to simulate the spatial distribution of water yield of Hainan Island under conditions of changing land use/land cover types in three scenarios according to the principle of water balance. The results show that the annual average water yield depth of Hainan Island was 979.04 mm. The central area of the island had the highest water yield and the western area had the lowest water yield. When the forest area was gradually reduced and the urban built-up area was doubled, the water yield increased most significantly, with an annual average water yield depth of 1004.06 mm. When the cultivated area was gradually reduced and the urban built-up area was doubled, the annual average water yield depth reached 1002.22 mm.

Key words: water yield; InVEST model; land use/land cover; Hainan Island

水资源是人类生活生产中最关键的资源之一, 水资源的分布直接决定了人口、耕地、企业等的区域布局, 也会对地区经济社会的发展产生极其重要的影响。因此, 研究分析区域水资源的时空分布与产水量、合理开发和利用水资源是非常有必要的。然

而, 产水是一个非常复杂的过程, 它与降水、蒸发、土地利用/覆盖、土壤渗透和植被蒸腾等因素密切相关, 目前应用于产水量分析的水文模型主要有MIKE SHE模型^[1]、TOPMODEL模型^[2]和SWAT模型^[3]等, 这些模型应用范围广, 模拟精度较高; 但是

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630042013018); 中国热带农业科学院本级基本科研业务费专项(1630042014004)

作者简介: 吴哲(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境影响评价与风险评价。E-mail: zhoushanshi@163.com

通信作者: 彭黎旭, 研究员。E-mail: Penglixu@hotmail.com

参数繁多,在实际应用中仍然面临很多问题。2010年,由斯坦福大学、TNC 和世界自然基金会合作联合开发的模型——InVEST(the integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs tool)模型^[4]被引入中国,该模型对于模型参数、特性数据要求较低;并且输入数据量少,输出量大;基于 GIS 平台,可以将量化的生态系统服务功能以地图的形式表达,不再用烦琐的计算公式、程序语言以及过多文字来表达^[5]。InVEST 模型拥有多个模块,采用多级设计,可以进行多尺度、多情景的分析,已被成功应用于夏威夷群岛^[6]、坦桑尼亚^[7]、北京山区^[8-9]、西苕溪^[10]、澜沧江^[11]等区域的生态系统服务功能及其价值的评估。

海南岛水资源丰富,属热带季风性气候,受东北和西南季风影响,热带风暴和台风频繁,由于海南岛城市排水系统存在诸多问题,内涝严重。随着海南国际旅游岛的建设,城区面积将不断扩大,也将改变产水量的空间格局。笔者设定 3 种不同情境,应用 InVEST 模型产水量模块分析土地利用/覆盖类型变化下海南岛产水量的空间分布,为城市的健康发展、水资源区划保护和合理开发提供科学依据。

1 研究区概况

海南岛是我国仅次于台湾岛的第二大岛,地处热带,介于北纬 18°10′~20°10′、东经 108°37′~111°03′之间,总面积约 3.4 万 km²;地势表现为中间高、四周低;森林覆盖率为 60.5%^[12],排名全国前 5;属典型的热带季风海洋性气候,年均降水量 1 500 mm,雨量充沛,但时空分布不均。全岛有 3 大河流:南渡江、昌化江、万泉河,3 大河流域面积约占全岛面积的 47%。海南岛的土壤普查面积约为 308.4 万 hm²,其中砖红壤占土地总面积的 53.42%;其次是赤红壤,占总面积的 10.01%;其余的自然土壤还有黄壤、燥红土、新积土、滨海沙土和火山灰土等。

2 模型结构和驱动数据

2.1 基本原理

产水量模块基于水量平衡原理,根据 Budyko^[13-14]曲线考虑了气候因子和水循环之间的密切关系。该模块简化了汇流过程,最终模拟了区域产水量的空间分布。计算公式为

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

式中: Y_{xj} 为第 j 土地利用类型、栅格 x 的产水量; E_{xj} 为第 j 土地利用类型、栅格 x 的每年实际蒸发量; P_x 为栅格 x 的年降雨量。

E_{xj}/P_x 计算水量平衡中的蒸散部分,计算公式为

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

其中

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

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} ET_{0x}}{P_x} \quad (4)$$

式中: ω_x 为植物可利用水量与年均降雨量的比值; R_{xj} 为第 j 土地利用类型、栅格 x 的无量纲的干燥指数; Z 为季节性因子,即表征季节性降雨特征的常数; W_x 为可利用水量; k_{xj} 为第 j 土地利用类型、栅格 x 的植被蒸散系数; ET_{0x} 为栅格 x 可能蒸散量。

2.2 数据来源和处理

InVEST 模型产水量模块需要的驱动数据有气象资料(降水量与可能蒸散量)、土地利用/土地覆盖类型、土层厚度和土壤有效水量以及生物物理参数资料等。

a. 气象资料来自于海南岛 18 个长期气象观测站 1980—2010 年 30 年的观测数据。海南岛年均降水量空间分布不均,西部少雨,最小的站点年均降水量约为 961 mm;东部多雨,最大的站点年均降水量约为 2 363 mm。根据克里金差值法制作出年均降水量栅格图。由于部分气象要素的缺失,根据气象干旱等级国家标准推荐的 Thornthwaite 方法进行可能蒸散量 ET_0 的计算:

$$ET_0 = 16 \left(\frac{10T_i}{H} \right)^A \quad (7)$$

其中

$$H = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (8)$$

$$A = 6.75 \times 10^{-7} H^3 - 7.71 \times 10^{-5} H^2 + 1.792 \times 10^{-2} H + 0.49 \quad (9)$$

式中: T_i 为 i ($i=1,2,\dots,12$) 月平均温度,℃; H 为年热量指数; A 为常数。

b. 土地利用/土地覆盖图来源于国际科学数据服务平台海南岛 TM 遥感影像,经过波段合成、镶嵌、校正、裁剪和解译获得。根据数据分析要求将土地利用/覆盖类型分为:常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林、混交林、草原、灌丛、湿地、城市建成区、裸地、水体、耕地等。

c. 土壤厚度数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心中国 1:100 万土壤图,通过提取土层厚度的数据并用 ArcGIS 中 Lookup 模块制作出土层厚度的栅格图。海南岛的土层厚度为 1m 左右。结合中国 1:100 万土壤图与世界土壤数据库中土壤

质地的分类,将粉粒、砂粒、黏粒、有机质等质量分数导入土壤有效水量经验公式式(10)^[15],提取得到土壤有效水量栅格图。

$$W_x = 54.509 - 0.132\omega_{sa} - 0.003\omega_{sa}^2 - 0.055\omega_{si} - 0.006\omega_{si}^2 - 0.738\omega_{cl} + 0.007\omega_{cl}^2 - 2.688\omega_{OM} + 0.501\omega_{OM}^2 \quad (10)$$

式中: W_x 为可利用水量; ω_{sa} 为砂粒质量分数,%; ω_{si} 为粉粒质量分数,%; ω_{cl} 为黏粒质量分数,%; ω_{OM} 为有机质质量分数,%。

d. 生物物理参数资料反映了土地利用/覆盖类型的属性,包括土地利用/覆盖编码、作物根系深度、蒸散系数。作物根系深度数据根据 Canadell 等^[16]对全球范围内植被最大根深的研究获得。蒸散系数则根据联合国粮农组织作物蒸散系数指南、InVEST 用户指南以及 Allen 等^[17]估算获得。海南岛作物根系深度和蒸散系数见表 1。

表 1 海南岛作物根系深度和蒸散系数

编码	土地利用/覆盖	根系深度/mm	蒸散系数
1	草原	12000	650
2	灌丛	5200	398
3	湿地	2000	1000
4	城市建成区	1	200
5	裸地	1	200
6	水体	1	1000
7	耕地	2100	650
8	常绿阔叶林	7300	1000
9	落叶阔叶林	3700	1000
10	常绿针叶林	7300	1000
11	落叶针叶林	3700	1000
12	混交林	5000	1000

2.3 情境的设定

2010 年,随着海南国际旅游岛建设正式步入正轨,城市化进程将不断加快。目前,海南岛城市规模较小,城镇化率偏低,因此扩大城市的空间框架,提高城市的规模等级是加快城市化进程的重要步骤。2010 年,海南岛城市建成区面积比 2000 年增长了 62.63%。依据海南土地利用总体规划、统计年鉴建

成区的扩展趋势,并结合近 20 年中国城市建成区的发展格局,预计至 2020 年,海南岛城市建成区面积将比 2010 年增长 1 倍。然而城区面积的增长必然引起耕地、林地等土地利用类型面积的缩减,从而影响区域水循环的过程。本文设定 3 种不同情境,分析土地利用变化对产水量的影响。

情境 1:2010 年海南岛土地利用/覆盖状况;

情境 2:假设其他因子不变,林地向城市建成区转化,林地面积减少,至 2020 年各个市(县)城市建成区面积翻番;

情境 3:假设其他因子不变,耕地向城市建成区转化,耕地面积减少,至 2020 年各个市(县)城市建成区面积翻番。

3 研究结果与分析

3.1 模型校验

调节季节性因子,取值范围为 1~10,对产水量模块的输出结果进行校验。根据历年海南省水资源公报以及海南省统计年鉴,经过对产水量模块的反复调试,发现当季节性因子取值为 7.5 时,较接近海南岛多年平均产水量。年均产水量为 335 亿 m^3 ,折算为多年平均产水深为 979.04 mm。

3.2 结果分析

根据 3 种情境的设定,海南岛年产水深、年产水量空间分布模拟结果如图 1、图 2 所示。

根据图 1、图 2 和表 2 情境 1 的模拟结果可知,海南岛中部地区产水量最大,可达 12239.67 m^3/hm^2 ,西部地区产水量最少,最低值仅为 5021.18 m^3/hm^2 ,可见海南岛产水量的空间分布是极不平衡的。中部地区雨量充沛,年均降水量可达 2000 mm 以上,并且该地区地势较高,是多条河流的发源地。西部地区处于东南季风的背风坡,年均降水量在 1000 mm 以下,而蒸散量较大,产水量较少。由情境 2 的模拟结果可见,随着林地向城市建成区转化,产水量将大幅增加。年均产水深可达 1004.06 mm,最大产水量为

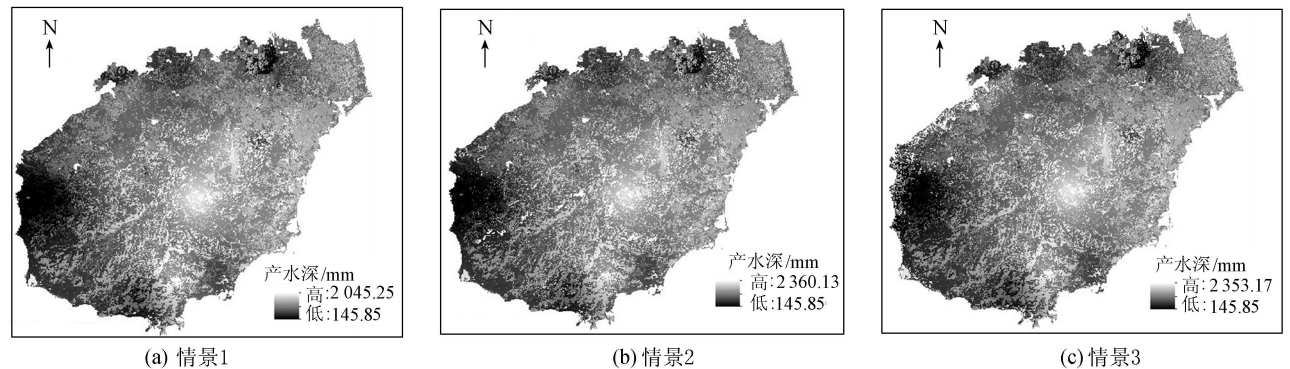


图 1 3 种情景下海南岛年产水深空间分布

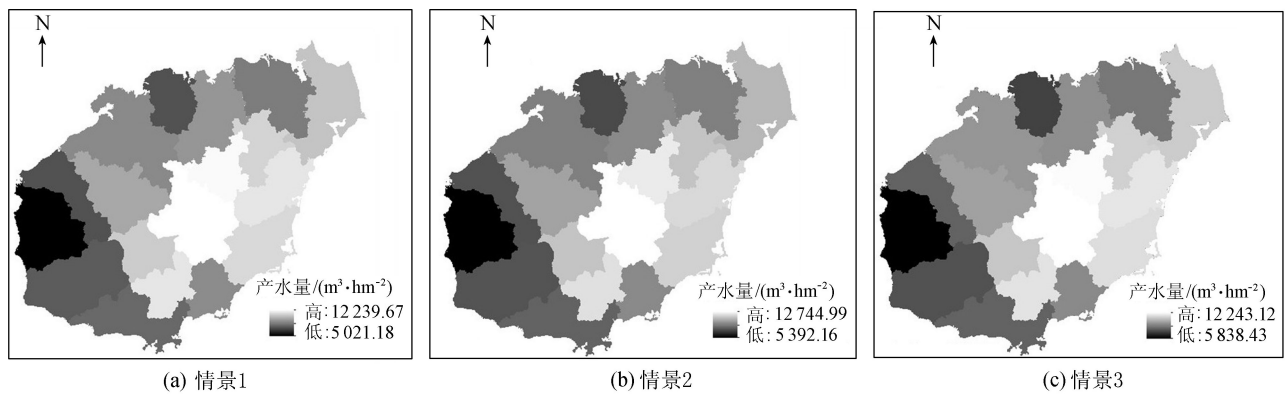


图2 3种情景下的海南岛年产水量空间分布

表2 海南岛各市(县)产水量

地名	产水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$		
	情境1	情境2	情境3
海口	9 117.95	9 570.00	9 332.46
三亚	8 651.52	8 873.95	8 867.88
五指山	11 045.30	11 315.52	11 053.76
文昌	10 837.08	11 010.60	10 961.25
琼海	11 659.66	11 830.55	11 729.14
万宁	11 353.90	11 645.55	11 507.05
定安	11 204.86	11 291.48	11 265.60
屯昌	12 158.00	12 263.79	12 189.68
澄迈	9 797.88	9 864.14	9 851.63
临高	8 143.79	8 211.92	8 181.99
儋州	9 457.34	9 619.75	9 608.13
东方	5 021.18	5 392.16	5 838.43
乐东	8 357.48	8 531.27	8 519.93
琼中	12 239.67	12 744.99	12 243.12
保亭	11 657.36	11 993.17	11 669.75
陵水	9 516.04	9 832.81	9 701.23
白沙	10 192.05	10 489.91	10 206.11
昌江	8 144.75	8 444.13	8 324.42

12 744.99 m^3/hm^2 , 最小产水量为 5 392.16 m^3/hm^2 。每个市(县)的产水量都出现大幅上涨,其中海口市的产水量由情境1的 9 117.95 m^3/hm^2 增长至 9 570.00 m^3/hm^2 ,三亚市的产水量由 8 651.52 m^3/hm^2 上升至 8 873.95 m^3/hm^2 。由情境3的模拟结果来看,耕地面积减少,城市建成区面积增长1倍,年均产水深将增长到 1 002.22 mm,最大产水量为 12 243.12 m^3/hm^2 ,最小产水量为 5 838.43 m^3/hm^2 。

由以上分析可知城市建成区面积的扩展,林地和耕地面积的下降对海南岛年均产水量有较大影响。热带森林具有很深的根系,能够吸取深层土壤的水分;且林地土壤的渗透性强,对降雨有较强的拦截作用。耕地较于林地对降雨的拦截能力较弱,根系较浅,因此当耕地转化为城市建设用地时,产水量的增加量小于林地转化为城市建设用地的增加量。城市建成区的地表一般由混凝土、沥青、水泥等构成,下渗几乎为零。随着区域城市化快速发展,城区面积不断扩大,大面积的天然植被和耕地被住宅、街

道、工厂等商业用地代替,蒸散减少,地下水位降低,不透水面积也将大量增加^[18-20]。城市化过程破坏了土壤结构,降低了土壤含水量,因此城市建成区的产水量较大。

3.3 模拟结果验证

根据中国水资源公报、海南省水资源公报、海南省统计年鉴以及海南岛各个水文站点实测径流量等相关数据,情景1的模拟结果与实测结果较为一致。各个市(县)多年产水量模拟值的相对误差在 0.9%~36.1%之间。

4 结论

a. 海南岛水资源丰富,但时空分布不均,年均产水深可达 979.04 mm。中部地区产水量最多,产水量可达 12 239.67 m^3/hm^2 ,西部地区产水量最少,产水量仅为 5 021.18 m^3/hm^2 。

b. 当林地面积逐渐减少、城市建成区面积增长1倍时,产水量的增加量最大,年均产水深可达 1 004.06 mm,最大产水量和最小产水量分别为 12 744.99 m^3/hm^2 和 5 392.16 m^3/hm^2 。

c. 当耕地面积逐渐减少,城市建成区面积增长1倍时,年均产水深增加到 1 002.22 mm,最大产水量和最小产水量分别为 12 243.12 m^3/hm^2 和 5 838.43 m^3/hm^2 。

d. 不同土地利用/覆盖方式的转换,其水文效应有较大的差别。其中林地向城市建成区转化,其产水增加量最大,水文效应的敏感性也最高。海南岛城市排水系统较为脆弱,内涝频繁。暴雨期间,多地道路被水淹没。因此,随着海南岛国际旅游岛的建设,城市面积的扩展应将产水量等水文因子考虑在内,对水资源进行合理的规划和管理,确定合适的城市规模和发展速度,尽量减少对林地的侵占,增加城市绿化面积,从而减少不透水面积的增加,增强城市的防洪抗灾能力。

参考文献:

- [1] 王盛萍,张志强,GE Sun,等.基于 MIKESHE 模型的潮河流域土地利用与降水变化对水文的影响评价[J].生态与农村环境学报,2012,28(3):320-325. (WANG Shengping, ZHANG Zhiqiang, GE Sun, et al. Assessing hydrological impacts of changes in land use and precipitation in Chaohe Watershed using MIKESHE model [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28 (3): 320-325. (in Chinese))
- [2] 王润,刘洪斌,武伟. TOPMODEL 模型研究进展与热点[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 47-48. (WANG Run, LIU Hongbin, WU Wei. Recent advances and research of TOPMODEL [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 47-48. (in Chinese))
- [3] 丁晋利,郑粉莉. SWAT 模型及其应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 128-130. (DING Jinli, ZHENG Fenli. SWAT model and its application [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 128-130. (in Chinese))
- [4] KAREIVA P, TALLIS H, RICKETTS T H, et al. Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services [M]. New York: Oxford University Press, 2011.
- [5] 海南省统计局. 海南统计年鉴 2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [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. (WU Zhe, CHEN Xin, LIU Beibei, et al. Research progress and application of InVEST model [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2013, 33(4): 58-62. (in Chinese))
- [7] GOLDSTEINA J H, Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions [J]. PNAS, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [8] FISHER B, TURNER R K, BURGESS N D, et al. Measuring, modeling and mapping ecosystem services in the Eastern Arc Mountains of Tanzania [J]. Progress in Physical Geography, 2011, 35(5): 595-611.
- [9] 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. (YANG Zhige, ZHOU Bin, YU Xinxiao, et al. Biodiversity analysis and carbon storage assessments in Beijing mountainous areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 42-46. (in Chinese))
- [10] 周彬,余新晓. 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. (ZHOU Bin, YU Xinxiao. Soil erosion simulation in mountain areas of Beijing based on InVEST model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(6): 9-13. (in Chinese))
- [11] ZHANG Canqiang. Water yield of Xitiao River basin based on InVEST modeling [J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1): 50-54.
- [12] CHEN Long, XIE Gaodi, ZHANG Changshun, et al. Modelling ecosystem water supply services across the Lancang River Basin [J]. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(4): 322-327.
- [13] DONOHUE R J, RODERICK M L, MC VICAR T R. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(2): 983-995.
- [14] 李斌,李丽娟,覃馥楚,等. 基于 Budyko 假设评估洮儿河流域中上游气候变化的径流影响[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 70-76. (LI Bin, LI Lijuan, QIN Yuchu, et al. Impacts of climate variability on streamflow in the upper and middle reaches of the Taoyer River based on the Budyko hypothesis [J]. Resources Science, 2011, 33(1): 70-76. (in Chinese))
- [15] ZHOU W Z, LIU G H, PAN J J, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 3-12.
- [16] CANADELL J, JACKSON R B, EHLERINGER J B. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale [J]. Oecologia, 1996, 108(4): 583-595.
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [C]//FAO irrigation and drainage. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [18] 李丽娟,姜德娟,李九一,等. 土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 211-224. (LI Lijuan, JIANG Dejuan, LI Jiuyi, et al. Advances in hydrological response to land use/land cover change [J]. Journal of Natural Resource, 2007, 22(2): 211-224. (in Chinese))
- [19] 李晓兵. 国际土地利用/土地覆盖变化的环境影响研究[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 395-400. (LI Xiaobing. International research on environmental consequence of land use/cover change [J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(4): 395-400. (in Chinese))
- [20] 王艳君,吕宏军,施雅风,等. 城市化流域的土地利用变化对水文过程的影响:以秦淮河流域为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 30-36. (WANG Yanjun, LU Hongjun, SHI Yafeng, et al. Impact of land use changes on hydrological processes in urbanized basin: a case study in Qinhuai River Basin [J]. Journal of Natural Resource, 2009, 24(1): 30-36. (in Chinese))

(收稿日期:2013-10-10 编辑:徐娟)