

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 03. 10

基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养能力评价及其变化特征分析

顾晋飴^{1,2}, 李一平^{1,2}, 杜 薇³

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要:将 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型中的产水量模型应用于太湖流域,定量评价太湖流域的水源涵养能力及其变化特征。结果表明:总产水量变化上,1990—2010 年太湖流域生态系统总产水量波动性明显;空间分布上,南部地区单位面积的产水量较高,山区丘陵地带产水量比平原地带高。流域水源涵养能力分异性特征明显,降水量较土地利用/覆被更显著地驱动产水量的变化。

关键词:水源涵养能力;InVEST 模型;产水量;太湖流域

中图分类号:TV211.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)03 - 0062 - 06

Evaluation on water source conservation capacity and analysis of its variation characteristics of Taihu Lake Basin based on InVEST model

GU Jinyi^{1,2}, LI Yiping^{1,2}, DU Wei³

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract:The water yield model of integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs (InVEST) model was employed to estimate the water source conservation capacity of the Taihu Lake Basin and analyse its variation characteristics. The results show that the total water yield of the Taihu Lake Basin fluctuates obviously from 1990 to 2012. Water yield per unit area in the southern region is higher. The water yield of hilly area is higher than that in plain area. The differentiation of the water source conservation capacity of the Taihu Lake Basin is obvious. Compared with land use/land cover, rainfall significantly drives the change of water yield.

Key words:water source conservation capacity; InVEST model; water yield; Taihu Lake Basin

生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成和维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用。它包括各类生态系统提供的食物和工农业生产的原料,支撑了地球的生命保障系统,维持生命物质

基金项目:创新研究群体科学基金(51421006)
作者简介:顾晋飴(1990—),女,硕士研究生,研究方向为水环境模拟。E-mail:983361979@qq.com
通信作者:李一平,教授,博士生导师。E-mail:liyiping@hhu.edu.cn

的生物地球化学循环与水文循环^[1-3]。水源涵养和水资源供给是生态系统提供的重要服务类型,生态系统水资源供给服务可以采用产水量进行评价。气候及土地利用/覆被变化会影响蒸散发、渗透和截留量。近几十年来,气候变化和频繁的人类活动,特别是城镇化和经济社会的快速发展引起了土地利用/覆被变化,已经对流域水文过程产生了剧烈影响,对地区水源涵养能力产生了深刻影响。太湖流域是我国经济最发达、社会发展最具活力的区域之一。生态系统的水源涵养功能对水资源的规划管理和区域可持续发展具有十分重要的意义,定量描述生态系统涵养水分的功能能够为流域生态文明建设提供科学依据和决策支持。国内外针对历史时期太湖流域的水文循环已有一些相关研究,但时间序列相对较短,且因不同学者的出发点和聚焦点不同,针对较长时段的太湖水源涵养能力的计算及其变化特征的描述十分匮乏。本研究以太湖流域为空间尺度,以25年为时间尺度,基于 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)产水量模型计算得到的产水量评价水源涵养能力,分析其时空变化特征,以为为进一步研究提供支持。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

太湖流域位于我国东部长江三角洲区域(图1),北抵长江,东临东海,南滨钱塘江,西倚天目山、茅山等,面积约3.69万km²。区域属亚热带季风气候区,年均气温15~17℃。多年平均降水量为1180mm。地势呈西高东低,四周高中间低,西部是上游山区独立水系,东部为下游平原河网水系。在水资源三级分区中,划分了湖西及湖区、武阳区、杭嘉湖区和黄浦江4个区域。2015年太湖流域总人口约5997万人,占全国总人口4.4%,GDP为66884亿元,占全国GDP的9.9%^[4]。

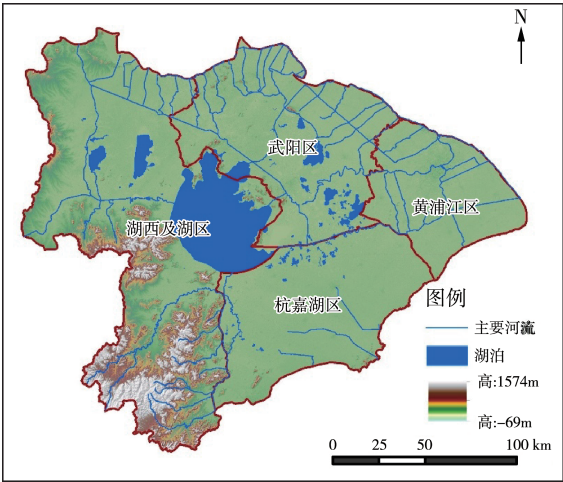


图1 太湖流域地理位置及水系分布

1.2 研究方法

1.2.1 产水量模型

采用 InVEST 产水量模型计算产水量,该模型由斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会于2007年联合开发,用于生态系统服务评估。它由多个子模块组成,其中产水量模型是重要的基础模块之一,目前的应用研究多趋向于大尺度,如区域、地区乃至全球尺度^[5]。相对于其他水文模型,InVEST 产水量模型依托于地理信息系统,在空间分析与展示上具有优势。

InVEST 产水量模型主要基于 Budyko 理论和水量平衡原理。苏联气候学家 Budyko 在研究全球水量和能量平衡时,指出陆面长期平均的蒸散发主要由大气对陆面的水分供给(降水量)和蒸发需求(净辐射量或潜在蒸散发量)之间的平衡来决定^[6-9]。InVEST3.3.2 中产水量模型运行基于栅格数据,只考虑单个栅格的产水量,不考虑栅格之间产水量的计算,对流域内不同土地利用/覆被(栅格单元)的产水量进行计算,汇总得到流域及各子流域的产水量。将地表径流和地下水补给均看作生态系统产水量,因此不考虑地表水和地下水之间的时空转换,由此得到的产水量,即降水量减去蒸散发。模型参数包括年均降水量、年均参考蒸散发量、植被有效含水量、根限制层深度(用土壤深度代替)、根系深度、植被蒸散发系数以及土地利用类型分布等。其中,降水量、蒸散发量采用多年平均时段的参数值。

采用 InVEST 模型计算不同土地利用类型单元格上的产水量,计算公式^[10]为

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{A_{ETxj}}{P_x}\right)P_x \tag{1}$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 中植被类型为 j 的年产水量; A_{ETxj} 为栅格单元 x 中植被类型为 j 的蒸散发量; P_x 为栅格单元 x 的年平均产水量。

对于某一土地利用/覆被,基于简化的水量平衡, $\frac{A_{ETx}}{P_x}$ 可由 Budyko 曲线^[11]近似得到:

$$\frac{A_{ETx}}{P_x} = 1 + \frac{P_{ETx}}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{P_{ETx}}{P_x}\right)^{w_x}\right]^{1/w_x} \tag{2}$$

式中: P_{ETx} 为潜在蒸散发; w_x 为描述自然气候与土壤性质的经验参数,即修正植被年需水量与降水量的比值,InVEST3.3.2 中模型对 w_x 参数进行较大修正,以更适应全球范围的应用,见式(3)。模型中设定 w_x 最小值为常数 1.25,即对应裸土(根系深度为 0)的 w_x 值, w_x 最大值为 5。

$$w_x = Z \frac{A_{WCx}}{P_x} + 1.25 \quad (3)$$

式中: Z 为张系数,是表征当地多年平均降水特征的经验常数,是模型的关键参数,与年均降水事件数密切相关,对于降水总量相等的区域,降水次数越多,则 Z 值越大,适应于降水具有明显季节变化且降水次数较多(一个季节大约100次降水)的区域; A_{WCx} 为植物有效含水量,一般是指土壤在一定深度内能够贮藏的并能被植物利用的那部分水的数量,基于土壤纹理和有效根系深度得到。

1.2.2 数据来源和处理

InVEST模型所需数据包括土地利用/覆被、年降水量、年潜在蒸散发量、根限制层深度、植被可利用水分、集水区和子集水区以及反映每种土地利用/覆被属性的表格。

a. 土地利用/覆被。对全球变化科学研究数据出版系统中的中国5年间隔陆地生态系统空间分布数据集(1990—2010)进行裁剪得到太湖流域5期土地利用/覆被分布图(图2)。该数据集基于1990年、1995年、2000年、2005年和2010年卫星遥感数据,结合地面调查研发,经过分类处理得到,空间分辨率为100 m。

b. 降水量与参考蒸散发。年降水量采用中国气象数据网的中国地面降水月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0)累加得到,格点数据质量良好^[12]。模型所需降水数据采用1990年、1995年、2000年、2005年、2010年5期土地利用/覆被条件下对应年份的前后共5年的均值,即1990年土地利用/覆被对应年降水为1987年9月—1992年8月的年均降水量,1995年土地利用/覆被对应年降水为1992年9月—1997年8月的年均降水量,依次类推(图3)。

参考蒸散发是影响作物蓄水量估算的关键因素。目前估算参考蒸散发的方法主要有Penman-Monteith(PM)、Hargreaves(HG)、Thornthwaite法、Modified-Hargreaves法、Hamon法等。其中Penman-Monteith是由FAO推荐,是受到普遍认可的潜在蒸散发计算公式为

$$E_{T0} = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (4)$$

式中: E_{T0} 为参考腾发量; R_n 为冠层表面净辐射; T 为平均气温; e_a 为饱和水汽压; e_d 为实际水汽压; Δ 为饱和水汽压与气温关系曲线在处的切线斜率; γ 为湿度计常数; U_2 为2 m 高处的风速。

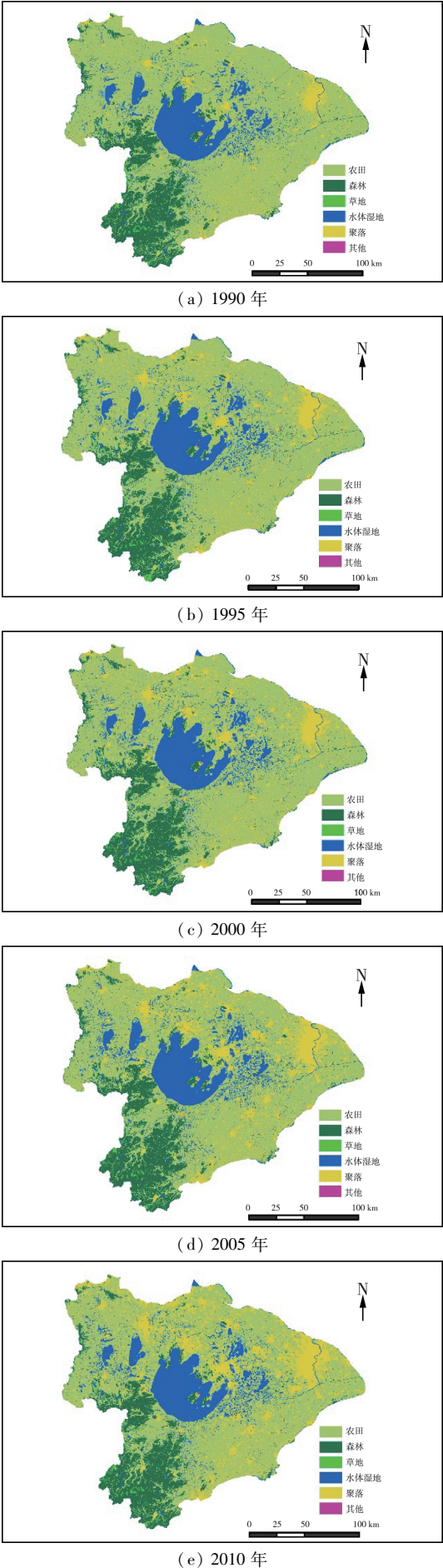


图2 太湖流域5期土地利用/覆被分布情况

选取太湖流域及其附近的 23 个站点 1987 年 9 月—2012 年 8 月的平均风速、日照时数、日最高气温、日最低气温、平均相对湿度、日最高大气压和日最低大气压等气象资料,计算得到各站点逐日参考蒸散发,取 5 年平均得到对应时刻的年均参考蒸散发,最终通过反距离权重法空间差值得到研究区的年均参考蒸散发的分布特征。

c. 根限制深度。指由于物理或化学特性的影响而强烈阻碍根系穿透时的土壤深度。根限制深度用土壤深度替代。土壤深度数据来自面向陆面模拟的中国土壤数据集的 soil profile depth PDEP. nc 数据文件,数据为栅格格式,空间分辨率为 30"。此数据集的源数据来自第二次土壤普查的 1:100 万中国土壤图和 8 595 个土壤剖面。数据集包括了全国范围内的土层厚度、土壤密度、土壤结构和有机质等数据^[13]。考虑到数据集中水体为无数据,结合土地利用类型,将水体(水库和河流)和人工硬表面(聚落)的土壤深度设定为 0,最终得到土壤深度图。

d. 植被可利用水分。指土壤在一定深度内储存的能被植物所利用的那部分水量。一般植被有效含水量可用田间持水量和永久萎蔫系数之间的插值来估算,InVEST3.3.2 中植被有效含水量的取值范围为 0~1,采用周文佐^[14]的基于土壤质地和土壤有机质的非线性拟合模型估算。

e. 生物物理参数。土地利用/覆被的生物物理因子包括代码、名称描述、植被最大根系深度和植被蒸散发系数。植被蒸散发系数用来调整参考蒸散发从而得到潜在蒸散发。对于作物而言,该系数可以通过联合国粮食及农业组织的灌溉与园艺手册查询,取值范围为 0~1.5。实际蒸散发计算代码用于判别土地利用类型是否为植被覆盖,用于蒸散发的计算。InVEST 产水量模型部分参数见表 1。此外,模型还需输入张系数,其值的范围为 1~20,基于太湖流域自然地理特点,参考相关文献将其取值为 6.5^[15]。

表 1 InVEST 产水量模型部分参数

编号	土地利用/覆被类型	植被蒸散发系数	最大根系深度/mm	实际蒸散发计算代码
1	农田	0.75	700	1
2	森林	1.00	7000	1
3	草地	0.65	2000	1
4	水体湿地	1.00	1300	0
5	荒漠聚落	0.28	500	0
7	其他	0.20	10	0

2 结果与分析

结合研究区自然地理及社会经济特点,根据模

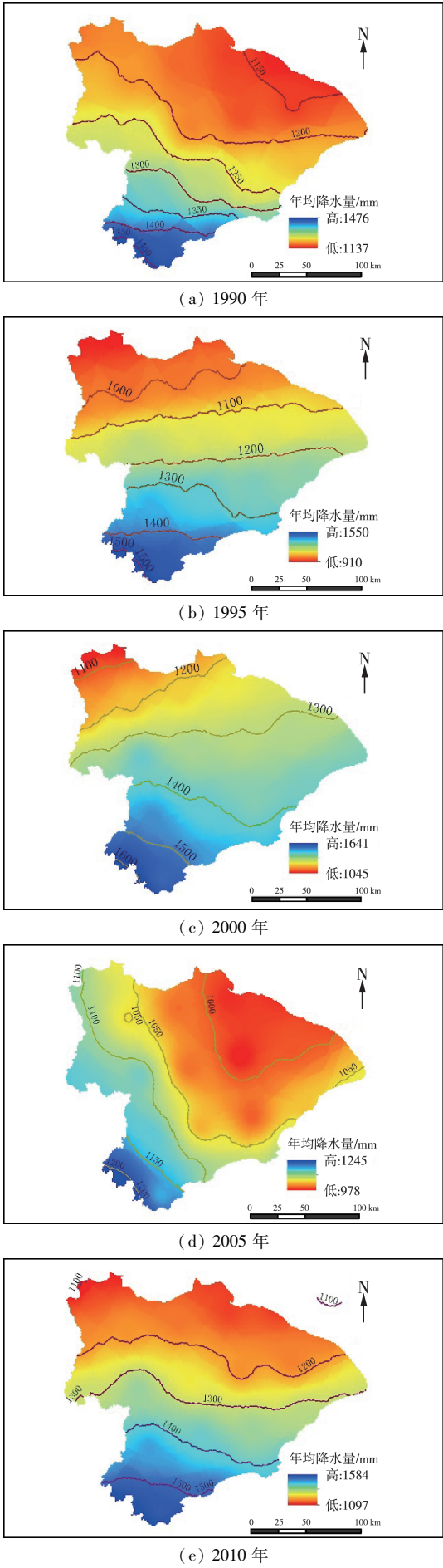


图 3 太湖流域 5 期年降水量(单位:mm)

型计算可得,影响水源涵养能力最主要的驱动因素为降水量和土地利用/覆被。

表2为太湖流域各区不同时期年降水量。由图3和表2可知,总体上4个区域的年降水量在时间序列变化趋势上是一致的,均在1995年和2005年出现了下降,其中2005年降幅最大,即气候的波动性最大。2010年降水量基本维持了1990年的水平,杭嘉湖区因为自然地理条件的差别,其降水量最大,时间趋势上波动幅度也最大。从空间分布上,降水量整体上呈自北向南增大趋势。每个年份降水量空间分布差异性较大,1990、2005年为自东北向西南增大趋势,1995、2000年为自西北向东南增大趋势,2010年为自北向南增大趋势。

表 2 太湖流域各区不同时期年降水量 mm					
区域	降水量				
	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
湖西及湖区	1 266	1 176	1 333	1 096	1 313
武阳区	1 166	1 057	1 261	998	1 180
杭嘉湖区	1 270	1 293	1 399	1 045	1 372
黄浦江区	1 172	1 420	1 332	1 015	1 227

表3为太湖流域不同时期土地利用/覆被类型比例变化情况。农田为主要优势的土地利用/覆被类型,森林和水体湿地次之,草地和其他两种类型所占比例最小,均小于0.5%。但是,农田所占比例呈逐年下降趋势,累计下降超过了总面积的12%;森林所占比例基本稳定,波动较小;草地总体呈下降趋势,自2000年以来,面积占比稳定在0.44%;水体湿地所占比例则呈连续上升趋势,但增长幅度不大,共增加了总面积的0.73%;聚落面积则大幅增加,累计增加超过总面积的10%;其他类型面积变化幅度不大,较为稳定。从时间序列上分为4个阶段:1990—1995年为第一阶段,1995—2000年为第二阶段,2000—2005年为第三阶段,2005—2010年为第四阶段。第三阶段是4个阶段中变化剧烈的时段。

表 3 太湖流域不同时期土地利用/覆被类型比例变化情况 %					
类型	变化比例				
	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
农 田	64.07	60.59	59.31	55.19	52.15
森 林	13.42	13.46	13.44	13.43	13.39
草 地	0.48	0.50	0.44	0.44	0.44
水体湿地	12.62	12.76	12.93	13.34	13.35
聚 落	9.37	12.65	13.84	17.55	20.64
其 他	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04

分析4个阶段不同土地利用/覆被类型之间的相互转换情况,可以看出农田被大幅度占用,聚落特别是建设用地大幅增加。随着经济的发展与人口的

增多,工业化与城市化的发展、交通建设用地增加与农业结构的调整是农田减少的主要原因。耕地的大量流失是经济快速发展地区面临的普遍问题,表明经济是耕地数量变化的最主要的驱动因素之一^[16-17]。太湖流域以耕地减少为主的土地利用变化深受包括开放沿海城市、房地产改革和沿江发展战略等国家宏观政策影响^[18-20]。

基于InVEST3.3.2产水量模型得到5期产水量分布(图4)及4个分区的产水量统计(表4)。1990年太湖流域产水量为286.1亿m³,单位面积生态系统产水能力为493~1306mm,均值为775mm;从单位面积产水能力来看,整体上产水量由东北向西南递增趋势。山区丘陵地带较平原地带产水量相对较高。单位面积产水量从大到小排序为杭嘉湖区、湖西及湖区、黄浦江区和武阳区。杭嘉湖区受海洋影响较大,产水量较其他3个分区高;武阳区靠近内陆,受海洋气候影响相对较小,单位面积产水量最小。1995年太湖流域产水量为255.3亿m³,单位面积生态系统产水能力为270~1351mm,均值为691mm;从单位面积产水能力来看,整体上产水量呈由西北向东南递增趋势,其余空间分布特征与1990年相似;与1990年相比,绝大部分区域的单位面积生态系统产水能力在减少。2000年太湖流域产水量为324.7亿m³,单位面积生态系统产水能力为473~1455mm,均值为880mm;从单位面积产水能力来看,整体上产水量由西北向东南递增趋势,产水能力较1990和1995年大幅增加,增幅超过10%。2005年太湖流域产水量为227.7亿m³,单位面积生态系统产水能力为291~1062mm,均值为617mm;从单位面积产水能力来看,整体上产水量由东北向西南递增趋势,产水能力较1990—2005年大幅减少。2010年太湖流域产水量为276.0亿m³,单位面积生态系统产水能力为280~1398mm,均值为748mm;从单位面积产水能力来看,整体上产水量由北向南递增趋势,产水能力与1990年大致持平,但空间分布较1990年区别很大,差异性和不平衡性较1990年大。

表 4 太湖流域各区产水量统计 mm					
区域	产水量				
	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
湖西及湖区	776	668	852	620	712
武阳区	715	590	822	578	695
杭嘉湖区	836	836	968	630	861
黄浦江区	750	707	910	622	764

1990—2010年,太湖流域产水量波动性明显。总体上,山区丘陵地带较平原地带产水量大。单位

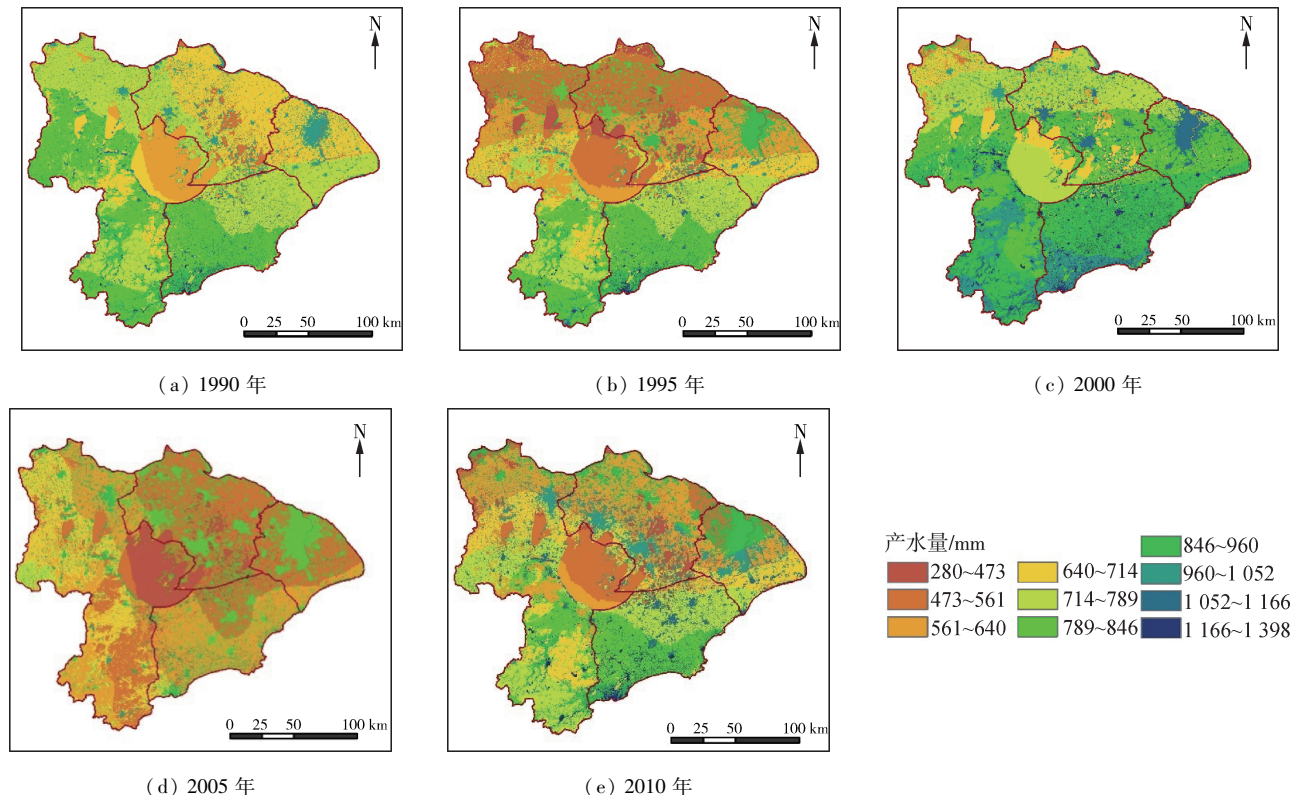


图4 太湖流域5期产水量

面积产水量从大到小排序为杭嘉湖区、湖西及湖区、黄浦江区和武阳区。4个分区在时间序列变化趋势上是一致的,均在1995年和2005年出现了下降,其中2005年降幅最大。单位面积产水量与降水量空间分布特征相一致,其大小变化与降水量高度相关。对4个分区年降水量和产水量相关性进行分析,其确定性系数 R^2 从大到小排序为:黄浦江区和武阳区、杭嘉湖区和湖西及湖区。这是因为黄浦江区和杭嘉湖区人类活动作用巨大,建设用地快速增加,杭嘉湖区同时受到海洋性气候影响,而湖西及湖区则存在丘陵山地,土地利用/覆被类型复杂。特别值得注意的是,产水量空间分布的差异性和不均衡性正在增大,聚落特别是建设用地增加使产水量增加,即增加了区域水源涵养生态系统功能。总体上,降水量对产水量的影响要大于土地利用/覆被。有关自然资源管理的决定应该围绕生态系统服务功能权衡及生态系统服务功能间的相互协同作用两个方面开展^[18-20]。

3 结 论

将InVEST产水量模型应用于太湖流域,得到1990—2010年每5年共5期的水源涵养能力即产水量变化情况。结果表明:太湖流域总产水量为227.7~324.7亿 m^3 ,波动性明显。山区丘陵地带较平原地带产水量大,南部地区较北部产水量大。单位面积产水量从大到小排序为杭嘉湖区、湖西及湖

区、黄浦江区和武阳区,这是自然地理特征和人类活动共同作用的结果。4个分区在时间序列变化趋势上是一致的。总体上,降水量对产水量的影响要大于土地利用/覆被。

参考文献:

- [1] 中国可持续发展林业战略研究项目组. 中国可持续发展林业战略研究总论[M]. 北京:中国林业出版社, 2002.
- [2] 欧阳志云,王效科. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报,1999,19(5): 607-613. (OUYANG Zhiyun, WANG Xiaoke. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values [J]. Acta Ecologica Sinica,1999,19(5):607-613. (in Chinese))
- [3] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems [J]. Pacific Conservation Biology, 1997,6(2):220-221.
- [4] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域和东南诸河水资源公报[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2012.
- [5] GOLDMAN R L. EcoLogic ecosystem services and water funds: conservation approaches that benefit people and biodiversity[J]. Journal,2009,101(12):20-22.
- [6] CARR J, COSTA F P D. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model [J]. Journal of Hydrology,1999,216(1/2):99-110.

(下转第84页)

- [9] 张国珍,王家福,武福平,等. 臭氧-活性炭技术处理炼化企业 RO 浓水[J]. 环境工程,2012,30(5):1-4. (ZHANG Guozhen, WANG Jiafu, WU Fuping, et al. Treatment of the reverse osmosis brine from the refining & chemical companies by using the ozone-activated carbon technology[J]. Environmental Engineering,2012,30(5):1-4. (in Chinese))
- [10] 李轶,倪凌峰,郭燕飞. 聚氨酯海绵负载二氧化钛/石墨烯复合蒙脱土漂浮材料可见光降解 17 α 乙炔基雌二醇[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):116-121. (LI Yi, NI Lingfeng, GUO Yanfei. Floating catalyst based on polyurethane foams modified with TiO₂/graphene-montmorillonite for visible-light degradation of 17 α ethinylestradiol [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (2): 116-121. (in Chinese))
- [11] 徐琪,周泽宇,王洪涛. 石墨烯-TiO₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解[J]. 环境科学,2016,37(8):3079-3085. (XU Qi, ZHOU Zeyu, WANG Hongtao. Generation of grapheme-titanium dioxide nanotubes catalytic board and its photocatalysis capability to degrade pentachlorophenol [J]. Environmental Science, 2016, 37 (8):3079-3085. (in Chinese))
- (收稿日期:2017-04-11 编辑:王 芳)

(上接第 67 页)

- [7] MILLY P C D, DUNNE K A. Macroscale water fluxes 2: water and energy supply control of their interannual variability[J]. Water Resources Research,2002,38(10):241-249.
- [8] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. 大气科学,1981,5(1)25-33. (FU Baopu. The calculation of surface evaporation [J]. Atmospheric Sciences, 1981, 5 (1) 25-33. (in Chinese))
- [9] 孙福宝,杨大文,刘志雨,等. 基于 Budyko 假设的黄河流域水热耦合平衡规律研究[J]. 水利学报,2007,38(4):409-416. (SUN Fubao, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Study on coupled water-energy balance in Yellow River basin based on Budyko Hypothesis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (4): 409-416. (in Chinese))
- [10] 严岩. 辽河流域生态系统评估[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [11] 陈骏宇,刘钢,白杨. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养服务价值评估[J]. 水利经济,2016,34(2):25-29. (CHEN Junyu, LIU Gang, BAI Yang. Evaluation of service value of water conservation in Taihu Lake basin based on InVEST model [J]. Journal of Economics of Water Resources,2016,34(2):25-29. (in Chinese))
- [12] 赵煜飞,朱江. 近 50 年中国降水格点日值数据集精度及评估[J]. 高原气象,2015,34(1):50-58. (ZHAO Yufei, ZHU Jiang. The accuracy and evaluation of the data sets of China's precipitation in the past 50 years [J]. Plateau Meteorology,2015,34(1):50-58. (in Chinese))
- [13] SHANG G, DAI W Y, LIU B, et al. A China data set of soil properties for landsurface modeling [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5 (2): 212-224.
- [14] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京:南京农业大学,2003.
- [15] ZHANG Canqiang, LI Wenhua, ZHANG Biao, et al. Water yield of Xitiaoxi River Basin based on InVEST modeling [J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3 (1): 50-54.
- [16] YANG G. The process and driving forces of change in arable-land area in the Yangtze River Delta during the past 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16: 121-127.
- [17] 万荣荣,杨桂山. 太湖流域土地利用与景观格局演变研究[J]. 应用生态学报,2005,16(3):475-480. (WAN Rongrong, YANG Guishan. Changes of land use and landscape pattern in Taihu Lake Basin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (3): 475-480. (in Chinese))
- [18] 朱威,周小平,蔡杰. 太湖流域水环境综合治理及其启示[J]. 水资源保护,2016,32(3):149-152. (ZHU Wei, ZHOU Xiaoping, CAI Jie. Lessons from comprehensive management of water environment in Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (3): 149-152. (in Chinese))
- [19] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. 不同土地利用/覆盖类型海南岛产水量空间分布模拟[J]. 水资源保护,2014,30(3):9-13. (WU Zhe, CHEN Xin, LIU Beibei, et al. Simulation of spatial distribution of water yield of Hainan Island with different types of land use/land cover [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (3): 9-13. (in Chinese))
- [20] 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):711-717. (BAI Yang, ZHENG Hua, ZHUANG Changwei, et al. Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian Basin: based on InVEST model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3):711-717. (in Chinese))
- (收稿日期:2017-06-03 编辑:王 芳)