

近 15a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析¹

顾铮鸣¹ 金晓斌^{1,2}, 沈春竹^{2,3}, 金志丰^{2,3}, 周寅康^{1,2}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京 210023; 2. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 江苏南京 210023; 3. 江苏省土地勘测规划院, 江苏南京 210000)

【摘要】: 定量评估生态系统服务功能是合理利用自然资源、促进人地关系与可持续发展的基础。以江苏省为研究区, 基于 InVEST 模型产水模块, 定量分析了江苏省 2000-2015 年产水功能和水源涵养功能的时空变化特征, 并采用回归分析和主成分分析法评估了水源涵养功能与社会经济要素之间的关系。结果表明: (1) 江苏省多年平均产水量为 $571 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$, 水源涵养总量 $78.39 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$; (2) 2000-2010 年江苏省水源涵养功能呈下降趋势, 2010~2015 年有所回升, 考虑到降水因素, 江苏省实际水源涵养功能持续降低; (3) 土地利用变化使 15a 来水源涵养功能下降 $15.2 \times 10^8 \text{m}^3$, 降低幅度为 16.9%; (4) 流域尺度上水源涵养功能与江苏社会经济因素相关关系不显著。研究结果可以为土地利用优化、流域水资源管理提供科学参考和支持。

【关键词】: 水源涵养 时空变化 InVEST 模型 主成分分析 江苏省

【中图分类号】: P344 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2018)11-2453-10

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201811007

根据 2005 年千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)结果, 全球范围内 60%的生态系统服务处于退化之中^[1]。开展生态系统服务的量化评估以实现有效生态系统管理, 对保障区域可持续发展具有重大意义^[2]。水资源作为人类生存发展和生产生活所必需的自然资源, 随着水资源的日益紧张和水环境恶化, 空间量化、可视化评估区域生态系统水源供给功能成为水文学、资源科学等领域的热点问题之一^[3]。流域作为水文水资源过程的基本单元, 围绕定量评估流域生态环境功能、加强水资源管控, 国内外学者对流域生态环境, 尤其是水源供给功能和水源涵养功能进行了大量研究^[4-6]。1997 年 Costanza 等^[7]估算了包括水文调节和水源供给功能在内的全球生态系统服务功能价值。此后, 研究内容从最初森林对河流径流的影响^[8], 发展到土地利用对降水、径流、蒸散发以及水质影响等^[9]。国内自 20 世纪 80 年代探索进行陆地生态系统水源涵养、土壤保持等功能评价以来^[10, 11], 相关研究经历了从概念理论到定量评估, 再到与 3S 技术相结合^[12], 研究方法包括水量平衡法^[13]、降水贮存法^[14]、蒸散发与径流估算法^[15]等。目前, 通过模型模拟定量化、精细化评估区域生态系统水源供给功能(产水功能)和水源涵养功能已成学术界的通用方法^[16], 常见的模型包括 MIKESHE (MIKE System Hydrological European) 模型、WetSpass (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under quasi-steady state) 模型、SWAT (Soiland Water Assessment Tool) 模型和 InVEST (Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs tool) 模型等。

¹收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-04-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B02)

作者简介: 顾铮鸣(1989~), 男, 博士研究生, 研究方向为土地利用与规划. E-mail: 869925197@qq.com

通讯作者 E-mail: jinxb@nju.edu.cn

水源涵养功能主要表现在拦蓄降水、调节径流、影响降水量、净化水质等方面，对改善水文状况、调节区域水分循环发挥着关键作用^[17]。自然因素方面，水源涵养功能受制于区域的植被覆盖、降水量、蒸发量、径流量和土壤厚度，人为因素方面，人类活动的加剧改变了土地利用类型的变化，在土地利用变化剧烈的区域涵养功能变化尤为突出^[18]。近年来，生态系统服务和交易的综合评估模型(InVEST)由于对特征数据要求较低，并通过“供给—服务—价值”框架将生产函数与人类福祉相结合^[19]，在水源涵养^[20, 21]、海岸带开发管理^[22]、土壤养分保持^[23]等方面得到了广泛应用并取得良好效果。其产水模块从水文角度，基于水量平衡原理，在中小流域尺度能够定量反映不同土地利用、气候、植被状况、土壤性质下的产水量状况，并以地图形式直观表达，进而揭示流域水源涵养功能，目前被广泛应用于黄土高原、海南岛、秦岭山麓等不同区域^[24-26]。

江苏省作为中国人口最集中、经济最发达的地区之一，伴随着人口增长和城镇化进程，在经济发展同时也带来用水短缺、水土保持能力退化、水环境破坏等一系列资源与生态环境问题^[27]。同时不同流域间也存在水资源分配不均，且与东部其他地区相比，江苏农业、建设用地所占比例较高，林地、草地占比相对较低，农田生态系统和城镇生态系统变化对水源涵养功能发挥更为直接的作用，进而影响到区域资源与环境的可持续发展。江苏省 21 世纪以来的土地利用发生了剧烈变化，显著改变了生态系统的结构与过程，而土地利用变化对生态系统的土壤水源涵养功能所带来的影响评估尚有不足。目前江苏省水资源主要存在以下方面：

(1) 时空分布不均。受降水制约，降水 60%~70%集中在汛期，各年水资源供给不稳定，南北差异较大；

(2) 调蓄能力低，农业生产压力大。多年平均过境水量 $9.49 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，但多年平均引江水量只有 $1.22 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，广义水资源量虽较多，但可供支配的水资源量较少。多年来，农业灌溉用水占比超过 50%，农业生产水足迹超过了 $1000 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[28]。因此，在流域尺度进行江苏省水源涵养功能时空格局分析，准确评估水源涵养功能现状与变化规律，可为制定国土规划、划定生态红线、确定整治分区等提供参考。

1 研究区概况

江苏省位于 $116^\circ 18' \sim 120^\circ 57' \text{E}$ ， $30^\circ 45' \sim 35^\circ 20' \text{N}$ 之间，水网密布，湖泊众多，北部属沂沭泗水系，中部属淮河下游水系，南部属长江流域；地理上跨越南北，四季分明，冬冷夏热，典型植被类型包括落叶阔叶林、落叶常绿阔叶混交林和常绿阔叶林；地形以平原为主，面积 10.72万 km^2 ，有大小河流 2900 余条，水域面积 1.73万 km^2 ，占全省总面积的 16%。江苏总人口 7960 万人，城镇化水平已达到约 70%。据统计，2014 年，江苏总用水量为 $4.81 \times 10^{10} \text{m}^3$ 。人均水资源量 502m^3 ，仅为全国平均水平 (2100m^3) 的 24%，万元 GDP 用水量 73.8m^3 ，为全国 (96m^3) 的 77%；优于瓜类水的河长 7716.4km ，占比 41.7%。江苏省可划分为 14 个三级流域(图 1)，包含 561 个重点水功能区，其中 317 个水质达标，达标率 56.5%^[29]。同时，江苏作为南水北调东线水源地，还承担着提高现有灌区的供水保证率、提供山东半岛城镇居民生活和工业用水、改善淮北地区农业供水条件、提高沿线易涝地区排涝能力的任务。

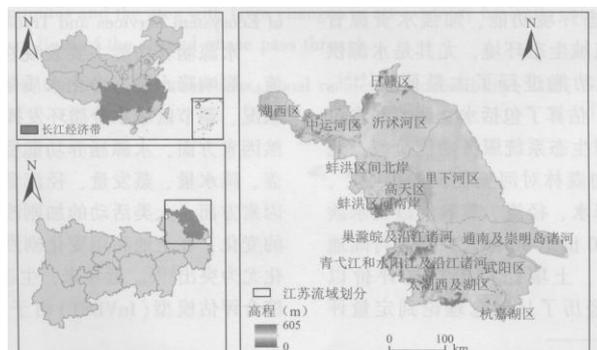


图 1 研究区概况

Fig. 1 Basins and elevation of the study area

2 研究方法与数据处理

2.1 数据来源与处理

InVEST 模型产水模型输入参数包括降雨量、潜在蒸散量、土地利用/覆盖类型、土壤厚度、土壤有效含水量以及生物物理参数等；水源涵养量计算则需要坡度、土壤饱和和导水率和流速系数；进行影响因素解析则需要相关生态及社会经济指标。相关基础数据获取如表 1 所示，并对原始数据进行计算和处理统一重采样为 1kmx1km 栅格，并结合已有研究得到模型所需的空间参数(图 2)和参数表^[24](表 2)。

表 1 模型参数数据来源及说明

Tab. 1 In VEST data needs and data sources

数据	来源
土地利用/覆盖	中国科学院资源环境数据中心
降水量	国家气象局站点数据插值
潜在蒸散量	利用 Thomthwait 方程计算得到
土壤深度	世界土壤数据库 (HWSD) 中的中国土壤 数据集
根系深, 度及流速系数	根据植被类型参考相关研究
植物可利用水量	根据土壤质地计算
蒸散系数	根据叶面积指数计算
土壤饱和和导水率	根据 NeuroTheta 软件计算
DEM	地理空间数据云
NPP	MODIS 卫星数据
NDVI	MODIS 卫星数据
耕地生产潜力	中国科学院资源环境数据中心
人口密度	中国科学院资源环境数据中心
GDP	中国科学院资源环境数据中心
距城镇距离	通过土地利用数据空间插值

2.2 水源涵养功能评估方法

2.2.1 InVEST 模型产水模块

InVEST 模型产水模块是一种基于水量平衡的估算方法，以栅格为单元的的降雨量减去实际蒸散发量后的水量即为水源供给量，包括地表径流、土壤含水量、冠层截留量和枯落物持水量，并据此来模拟区域水源供给量的空间分布^[30]。具体计算公示如下^[17]：

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

式中：Y_(x, j) 为第 j 类土地利用类型网格 x 的产水量；AET_(xj) 为第 j 类土地利用类型网格 x 的每年水分蒸散量；P_(xj) 为第 j 类土地利用类型网格 x 的年降雨量；AET_(x, j) / P_(x, j) 即为由 Zhang 等^[31]提出的近似 Budyko 曲线，以用来评估水平衡的蒸散分区。

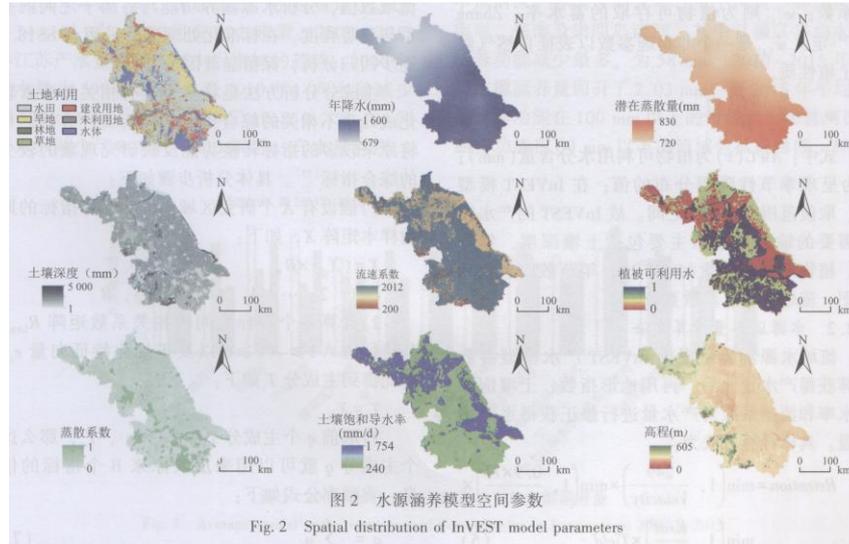


表 2 水源涵养模型参数表

Tab. 2 Input files for the water yield module

土地利用	根系深度 (mm)	流速系数	土地利用	根系深度 (mm)	流速 系数
灌溉水田	300	2 012	望天田	300	900
水浇地	300	900	旱地	300	900
菜地	300	600	园地	700	500
桑园	700	500	有林地	5 000	200
其他园地	700	500	疏林地	3 000	300
灌木林地	2 000	249	迹地	1	2 012
未成林地	1 500	400	天然草地	500	500
苗圃	500	600	农田水利用地	1	2 012
荒草地	500	400	农村居民用地	1	2 012
建制镇	1	2 012	特殊用地	1	2 012
独立工矿	1	2 012	工矿用地	1	2 012
铁路用地	1	2 012	水工建设用地	1	2 012
水库水面	1	2 012	养殖水面	1	2 012
坑塘水面	1	2 012	沙地	1	500
沼泽地	300	900	其他用地	1	500
裸岩石砾地	1	1 500	水塘	1	2 012
河流	1	2 012			

$$\frac{AET_{(xj)}}{P_{(xj)}} = \frac{1+w_{(x)}R_{(x)}}{1+w_{(x)}R_{(x)}+1/R_{(x)}} \quad (2)$$

$$R_{(x)} = \frac{K_C(l_x)ET_0(x)}{P_{(x)}} \quad (3)$$

式中： $R_{(x)}$ 为网格 x 的 Budyko 干旱指数，定义为潜在蒸散量与降雨量的比值； $ET_{0(x)}$ 为网格 x 的参考蒸散量； $K_{c(x)}$ 为土地利用网格 x 的植物蒸散系数； $w_{(x)}$ 则为植物可存取的蓄水率；Zhang 等^[31] 定义 $w_{(x)}$ 是一个非物理参数以表征自然气候与土壤性质。

$$w_{(x)} = Z \frac{AWC(x)}{P_{(x)}} \quad (4)$$

式中： $AWC(x)$ 为植物可利用水分含量 (mm)； Z 为呈现季节性降雨分布的值；在 InVEST 模型中，取值范围在 1~30 之间。故 InVEST 的产水模型需要的输入的数据主要包括土壤深度、年降雨、植物可利用水含 (PAWC)、年蒸散、土地利用图、流域分布、蒸散系数。

2.2.2 水源涵养量计算方法

流域水源涵养量根据 InVEST 产水模型参数计算获得产水量之后，再用地形指数、土壤饱和和导水率和流速系数对产水量进行修正获得水源涵养量。具体计算方法为：

$$Retention = \min\left(1, \frac{249}{Velocity}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{Ksat}{300}\right) \times Yield \quad (5)$$

式中： $Retention$ 为水源涵养量 (mm)； $Ksat$ 为土壤饱和和导水率 (mm/d)，通过 NeuroTheta 软件计算获得； $Velocity$ 为流速系数； TI 为地形指数，无量纲，根据公式 (6) 计算； $Yield$ 为产水量，根据 2.1 节公式计算。

$$TI = \lg\left(\frac{Drainage_Area}{Soil_Depth \times Percent_Slope}\right) \quad (6)$$

式中： $Drainage_Area$ 为集水区栅格数量，无量纲； $Soil_Depth$ 为土壤深度 (mm)； $Percent_Slope$ 为百分比坡度。

2.3 驱动力分析方法

为定量表征土地利用变化因素对水源涵养功能的影响，保持其他因子参数图层不变，将 2015 年土地利用图层以 2000 年图层替换，得到相应的产水功能与水源涵养功能结果，再减去 2000 年的实际结果，得到 15a 来流域产水深度和水源涵养功能变化量。

水源涵养功能变化受到诸多社会经济因素影响。为了更好表达水源涵养功能与社会经济发展之间的关系，本文选择构建社会经济系统与生态环境系统之间的指标体系，分别运用回归分析和主成分分析方法，得到能较好反映二者关系的主要指标^[32]。其中，回归分析是选取相关社会经济和生态指标，基于模型结果分区统计各因子的子流域数值，分析水源涵养功能与各因子之

间的关系与显著程度。在标准化处理后，采用 SPSS18.0 逐步回归分析，保留显著因子。

主成分分析方法是多个具有相关性要素转化成几个不相关的综合指标的分析统计方法，可将原来较多的指标转换为能反映研究现象的较少的综合指标^[33]。具体分析步骤如下：

1) 假设有 A 个研究区域，B 个选择指标的原始样本矩阵 X，如下：

$$X = (X_{ij}) \times B,$$

$$i = 1, 2, \dots, A, j = 1, 2, \dots, B$$

2) 计算各个指标之间的相关系数矩阵 $R_{b \times b}$ ，其特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq 0$ 以及正规化特征向量 e_j ，由此得到主成分 T_i 如下：

$$T_i = X_{gj}$$

3) 取前 q 个主成分 T_1, T_2, \dots, T_q ，那么这个主成分 q 就可以用来反映原来 B 个指标的信息。贡献率公式如下：

$$a = \sum_{i=1}^q a_j \quad (7)$$

本文在流域尺度下，对 2000 和 2010 年流域内水源涵养功能、降水、实际蒸散发（基于 InVEST 产水模块获取）、NPP、NDVI、耕地生产潜力、人口密度、GDP、距城镇距离 9 项指标进行回归分析，并在 1kmx1km 栅格下使用相同指标进行主成分分析。通过分析指标之间的关系，去除没有明显分异作用或相互间存在明显线性关系的指标后，用来确定最终目标。

3 模拟结果与分析

3.1 江苏省内流域涵养功能时空分布特征

以 2010 年为基准年，根据《江苏省水资源公报》，经过反复模拟计算，发现当 Z 值为 27.4 时，模拟产水量相对误差为 5.4%，此时 InVEST 产水模块模拟效果最优。

根据模拟结果，江苏多年平均产水量为 $571 \times 10^8 \text{m}^3$ ，平均产水深度 564.75mm。从空间上看，产水量空间分布格局总体上呈现由东南向西北递减的特征：杭嘉湖区单位面积平均产水量最高，多年平均单位面积产水量 722mm；苏北地区的湖西区和中运河区平均产水量最小，多年平均单位面积产生量在 400~450mm 之间。从产水量总量分布上来看，里下河区平均产水量最高，为 $126.68 \times 10^8 \text{m}^3$ ；杭嘉湖区产水总量最少，为 $3.74 \times 10^8 \text{m}^3$ 。从时间变化上来看，2000~2015 年江苏产水量呈现先减少后增加的趋势，2000 年产水量为 $599 \times 10^8 \text{m}^3$ ，至 2010 年，产水量减少到 $522 \times 10^8 \text{m}^3$ ，10a 间减少了 12.85%，而 10a 间降水只减少了 8.7%，2010 年后，产水量有所回升，2015 年产水量为 $593 \times 10^8 \text{m}^3$ ，基本恢复到 2000 年水平，而 2015 年的降水量与 2000 年相比要高出 18.27%，比多年平均降水高 26.2%，这说明江苏省实际产水功能仍然处于下降状态。

江苏省 2000-2015 年单位面积平均水源涵养量为 75.22mm，总量 $78.39 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2000-2010 年，平均减少了 18.45mm，平均水源涵养量减少量超过 20mm 的流域包括沂沭河区、日赣区、中运河区、蚌洪区间北岸、里下河区、蚌洪区间南岸、通南及崇明岛诸

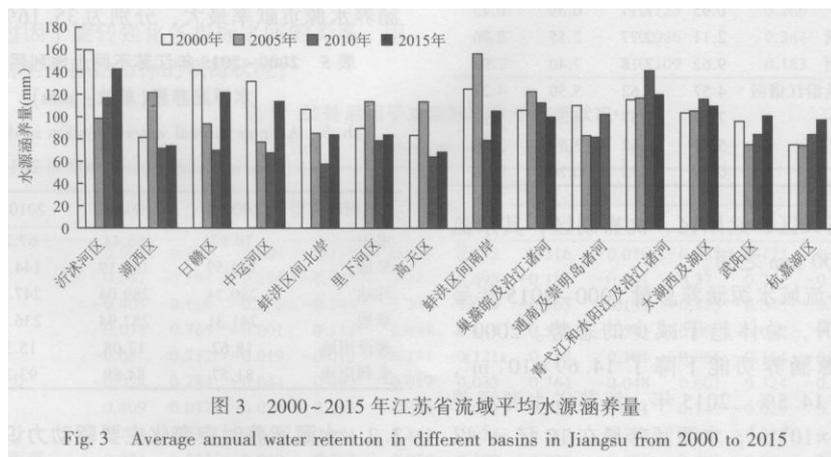
河，其中日赣区平均水源涵养功能减少最多，为 58mm。2010~2015 年平均水源涵养量回升了 2.03mm，至 2015 年平均水源涵养功能在 100mm 以上的流域只有沂沭河区，涵养功能在 60mm 以下的流域包括湖西区、蚌洪区间北岸、高天区、武阳区、杭嘉湖区，其余流域均在 60~100mm 之间。

表 3 2000~2015 年江苏省流域产水量(单位: 10⁸t)

Tab. 3 Total annual water supply in different basins in Jiangsu from 2000 to 2015

流域名称	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
沂沭河区	127.41	77.16	94.11	120.11
湖西区	13.45	19.71	12.37	13.08
日赣区	10.34	7.09	5.54	8.91
中运河区	30.68	17.79	18.06	27.75
蚌洪区间北岸	40.79	35.02	24.77	37.00
里下河区	122.69	152.81	110.35	120.88
高天区	23.75	36.08	22.63	24.00
蚌洪区间南岸	5.12	6.86	3.54	4.81
巢滁皖及沿江诸河	14.74	19.50	18.39	16.26
通南及崇明岛诸河	63.55	52.59	53.06	62.08
青弋江和水阳江及沿江诸河	28.19	29.94	37.71	32.18
太湖西及湖区	61.12	60.95	68.93	65.30
武阳区	55.38	44.13	50.96	58.93
杭嘉湖区	3.80	3.77	3.51	3.87

江苏省各流域水源涵养总量 2000~2015 年呈先下降后回升，总体趋于减少的态势。2000~2015 年，水源涵养功能下降了 14.69x10⁸m³, 15a 间下降了 14.5%。2015 年，江苏省水源涵养总量为 74.34x10⁸m³, 水源涵养量在 10 亿 m³ 以上的是沂沭河区和里下河区；在 1 亿 m³ 以下的是蚌洪区间南岸和杭嘉湖区；其他流域水源涵养量均在 1x10⁸~10x10⁸m³ 之间，而杭嘉湖区水源涵养总量最小，仅为 0.26X10⁸m³。



基于水源涵养功能结果，统计多年平均条件下不同土地利用类型的水源涵养功能。结果显示，林地的平均水源涵养深度为 271.97mm，草地为 243.43mm，未利用地为 90.26mm，旱地为 155.16mm，水田为 67.69mm，建设用地平均最弱，为 16.97mm。从总量上看，旱地和水田的涵养水源贡献率最大，分别为 35.16%和 28%。

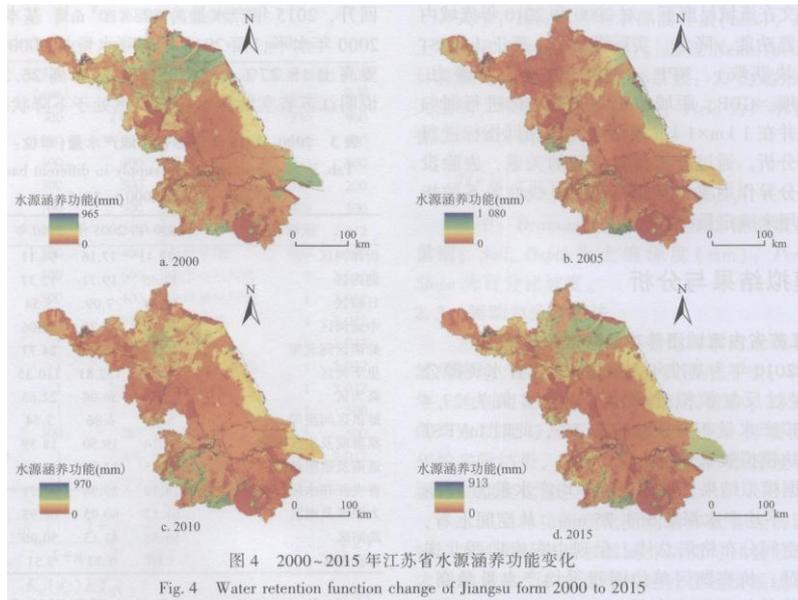


表 4 2000-2015 年江苏流域水源涵养量 (单位: 10^8t)

Tab. 4 Total water retention function in different basins in Jiangsu form 2000 to 2015

流域名称	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
沂沭河区	20.95	11.51	15.14	17.65
湖西区	2.42	3.43	2.28	1.95
日赣区	1.34	0.83	0.63	1.02
中运河区	5.35	3.04	3.26	4.29
蚌洪区间北岸	5.86	4.50	3.30	4.06
里下河区	19.30	23.43	17.23	16.79
高天区	3.38	3.85	2.39	2.38
蚌洪区间南岸	0.95	1.17	0.59	0.75
巢滁院及沿江诸河	2.11	2.77	2.55	2.06
通南及崇明岛诸河	9.62	7.18	7.40	7.96
青弋江和水阳江及沿江诸河	4.57	4.62	5.50	4.27
太湖西及湖区	7.46	7.57	8.24	7.12
武阳区	5.37	3.62	3.54	3.78
杭嘉湖区	0.35	0.35	0.26	0.26

3.2 水源涵养时空变化主要驱动力识别

土地利用变化所带来的水源涵养功能减少量如表 6 所示。15a 间, 在土地利用变化影响下, 江苏子流域产水深度变化变化值为 $-27.38 \sim 17.28\text{mm}$ 之间, 总产水量减少了 $17.1 \times 10^8\text{m}^3$, 除武阳区和杭嘉湖区外, 其余流域均有减少。单位面积水源涵养功能变化值在 $-25.07 \sim -9.96\text{mm}$ 之间, 涵养总量减少 $15.2 \times 10^8\text{m}^3$, 说明 15a 来江苏水源涵养能力下降严重, 特别是高天区、青弋江和水阳江及沿江水系和武阳区, 单位面积水源涵养量减少超过 $200\text{m}^3/\text{hm}^2/\text{a}$, 而这些区域也是城乡建设用地增长最为显著的地区。2000~2015 年土地利用转移矩阵中, 水田和旱地变化最大, 多数转化成为建设用地, 分别转化了 4853.18km^2 和 1641.63km^2 。总体而言, 15a 间江苏省土地利用变化剧烈, 土地利用变化导致的产水功能变化相对较小, 但对水源涵养功能影响显著。15a 来, 江苏省实际水源涵养功能下降了 16.9%。

表 5 2000~2015 年江苏不同土地利用类型平均水源涵养量 (单位: mm)

Tab. 5 Average annual water retention in different land uses in Jiangsu from 2000 to 2015

土地利用类型	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
水田	70.87	66.44	67.29	66.15
旱地	174.59	145.19	144.61	156.24
林地	280.24	289.04	247.81	270.79
草地	241.31	252.94	236.05	243.41
建设用地	18.62	17.08	15.39	16.78
未利用地	81.57	84.89	93.38	101.18

为定量揭示土地利用变化与水源涵养功能变化之间的关系, 将 2000-2015 年土地利用变化图层与实际水源涵养功能变化图层叠加, 得到 15a 来土地利用转移导致的水源涵养功能变化情况。如表 5 所示, 建设用地扩张是导致水源涵养功能下降的主要因素, 15a 来随着建设用地面积增加, 江苏水源涵养量减少了 $8.74 \times 10^8 \text{m}^3$, 占实际水源涵养减少的 57.5%, 其中由于占用农用地而减少的水源涵养功能为 $7.64 \times 10^8 \text{m}^3$; 15a 来水田的实际水源涵养功能下降了 $3.01 \times 10^8 \text{m}^3$, 由于水田自身涵养能力下降导致的涵养功能降低了 $1.41 \times 10^8 \text{m}^3$; 旱地的水源涵养功能下降了 $-2.74 \times 10^8 \text{m}^3$, 自身《养能力下降了 $2.71 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

表 6 2000~2015 年江苏土地类型实际涵养功能变化 (单位: m^3/hm^2 , 10^8m^3)

Tab. 6 Actual water retention function change by land use change of Jiangsu from 2000 to 2015

2015 年	水田		旱地		林草地		建设用地		未利用地	
	单位变化	总量变化	单位变化	总量变化	单位变化	总量变化	单位变化	总量变化	单位变化	总量变化
2000 年										
水田	-37.1	-1.41	937.03	0.06	2 000.4	0.09	-974.46	-4.21	2 307	0.04
旱地	-821.43	-1.48	-126.84	-2.71	991.57	0.05	-2 107.05	-3.43	1 416.85	0.03
林草地	-1 994.63	-0.19	-1 009.41	-0.2	-77.27	-0.25	-4 665.36	-0.9	-1 208.42	-0.08
建设用地	497.55	0.08	1 311.98	0.11	2 869.03	0.07	-5.64	-0.08	3 292.88	0.06
未利用地	-263.94	-0.01	569.71	0.00	1 821.34	0.04	-1 775.39	-0.05	0.24	0.00

表 7 子流域水源涵养功能影响因子

Tab. 7 Influencing factors of water retention quantity of sub-basin

水源涵养功能影响因子 (retention_ mm)			
保留因子	B(降序)	R ²	Sig
降水	0.708	0.661	0.01
实际蒸散量	-0.434	0.412	0.05
人口	-0.123	0.266	0.05
GDP	-0.086	0.344	0.05
NPP	0.109	0.183	0.05

由表 7 可知, 水源涵养功能的妒显著性很弱, 拟合方程不能很好反映相关因子信息, 这说明水源涵养功能的驱动因素与社会经济系统之间并非单纯的线性关系。而主成分分析在通过 KM0 检验和显著性检验后, 得到计算结果 (表 8)。前 4 项的累积值超过 65% (2000、2010、2015 年累积贡献率分别为 65.11%、70.62%、68.25%), 将前 4 项作为主成分因子, 并通过因子旋转强化各指标之间的关系, 用以表征各指标对于原始指标的载荷状况。

表 8 结果表明, 2000 年, 主成分 1 主要受人口、GDP 影响, 主成分 2 主要受 NPP、NDVI 影响, 主成分 3 主要受水源涵养功能影响; 距城镇距离在主成分 4 中最为显著; 2010 年, 人口和 GDP 仍在主成分 1 中占主导地位, 主成分 2 主要受水源涵养功能

和降水影响，主成分3主要受耕地生产潜力影响；至2015年，主成分1主要受人口、GDP、NPP影响，主成分2主要受水源涵养和降水影响，主成分3主要受蒸散发影响。可以看出，第1主成分主要反映了江苏社会经济因素，第2、第3主成分主要反映了江苏省生态、农业生产、水源涵养情况，第4主成分主要反映城镇与各指标之间关系。

表8 旋转后因子对原始指标的载荷状况

Tab. 8 Rotated component matrix

	2000				2010				2015			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
水源涵养	-0.091	0.192	0.828	0.179	-0.003	0.792	0.316	-0.016	-0.225	0.772	0.218	0.06
降水	0.042	-0.251	0.815	-0.187	0.247	0.693	-0.181	-0.441	0.37	0.78	-0.099	-0.142
实际蒸散发	-0.405	-0.186	-0.232	-0.544	-0.293	0.639	-0.363	0.137	-0.123	0.043	0.817	-0.051
NPP	-0.033	0.765	-0.001	0.113	0.034	0.149	0.572	0.541	-0.08	-0.042	0.246	0.067
NDVI	-0.08	0.772	-0.019	-0.012	-0.281	-0.121	0.488	0.101	-0.066	-0.114	-0.004	-0.105
耕地生产潜力	-0.024	0.284	-0.044	0.492	-0.017	0.033	0.764	-0.048	0.601	0.324	-0.223	0.185
人口	0.809	0.017	-0.029	0.035	0.882	-0.071	0.029	0.061	0.742	-0.029	0.104	-0.634
GDP	0.798	-0.215	-0.048	-0.184	0.861	0.034	-0.217	-0.155	0.627	-0.073	-0.673	-0.126
距城镇中心距离	-0.234	-0.232	-0.049	0.757	-0.058	-0.109	-0.029	0.873	-0.406	-0.07	0.165	0.779

2000年，人口密度、GDP在主成分1中作用明显，NPP、NDVI、农田生产潜力等影响为负面；至2010年，NDVI和耕地生产潜力的负面载荷有所增加，2015年这一状况仍在持续。这说明随着江苏省经济发展和人口增加，对区域生态和耕地生产潜力造成了显著负面影响；在主成分2中，2000年NPP和耕NDVI占比较大，其他因素占比较小，而降水等因素展现为负面，至2010年和2015年，占比较大的是水源涵养功能和降水，说明水源涵养功能在江苏生态安全中的重要性有所提升。

4 结论和讨论

本文基于InVEST模型，在1kmx1km栅格下，对江苏省流域单元2000~2015年产水量与水源涵养功能进行了分析和评估，在此基础上，使用回归分析和主成分分析法分别评估了在流域和1kmx1km尺度下2000、2010、2015年江苏省水源涵养功能和其他生态、社会经济因素之间的关系。主要结论如下：

(1) 江苏省多年平均产水量为 $571 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，平均产水深度564.75mm。水源涵养总量 $78.39 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，水源涵养能力75.22mm。从空间分布上看，产水量在空间分布上呈现东高西低、南高北低的特征，水源涵养量空间分布则呈现苏南、苏北较高，苏中较低的特点。

(2) 2000~2010年，江苏省内产水量和水源涵养功能整体呈减少趋势，单位面积产水量减少了75.82mm，水源涵养量减少了18.45mm，2010~2015年江苏省产水量和水源涵养功能有所提

升，较之2010年分别增加了73.86mm和3.5mm。考虑到2015年前后江苏省降水量比多年平均降水要高26.2%，江苏省2000~2015年实际产水功能和水源涵养功能持续下降。

(3) 2000~2015年由土地利用变化导致的产水功能减少了 $17.1 \times 10^8 \text{m}^3$ ，水源涵养功能减少了 $15.2 \times 10^8 \text{m}^3$ ，苏北地区水源涵养功能减少尤为显著。由于建设用地扩张，江苏省实际水源涵养功能下降了 $8.74 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占实际水源涵养减少的57.5%。

(4) 流域尺度上水源涵养功能与社会经济及其他生态环境因素的相关性较弱，而在栅格尺度上，江苏在经济发展、人口增长、城镇化水平提高的同时，对水源涵养功能及其他生态指标带来了负面影响。水源涵养功能与社会经济系统之间的关系还需

进一步研究。

准确评估区域产水量和水源涵养量是制定水资源利用、生态保护等政策与规划的基础。本文采用 InVEST 模型对江苏省 2000~2015 年水源涵养功能进行了定量评估,但考虑到模型、数据精度等因素,未来在以下方面还需要作进一步研究:①水源涵养功能变化受到气候变化和土地利用变化的双重影响,如何定量分析气候、土地利用变化、下垫面特征等因素对产水量、水源涵养功能的影响是未来亟待解决的关键问题;②在水源涵养重要性评价中还需要定量考虑水源涵养与实际需水之间的关系,为流域生态保护与建设提供科学依据。

参考文献:

- [1] UNITE NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM. Millennium ecosystem assessment: ecosystems and human well-being [M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] 李双成,刘金龙,张才玉,等.生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J].地理学报,2011,66(12):1618-1630. LI S C, LIU J L, ZHANG C Y, et al. The research trends of ecosystem services and the paradigm in geography [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 66(12): 1618-1630.
- [3] 吕一河,胡健,孙飞翔,等.水源涵养与水源调节: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.
- Ltf Y H, HU J, SUN F X, et al. Water retention and hydrological regulation: harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [4] 刘斌涛,陶和平,孔博.云南省水资源时空分布格局及综合评价[J].自然资源学报,2014,29(3):454-465.
- LIU B T, TAO H P, KONG B. Research on the water resource security and its temporal-spatial distributions of Yunnan Province, China[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3) : 454- 465.
- [5] PAMELA A G, CHAELES J V, IAN H, et al. Freshwater ecosystem services supporting humans: pivoting from water crisis to water solutions [J]. Global Environmental Change, 2015, 34 (September 2015) : 108-118.
- [6] 潘销,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时空变化[J]:应用生态学报,2013,24(1):183-189.
- PAN T, WU S H, DAI E F, et al. Spatio-temporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1) : 183-189.
- [7] COSTANZA R, DARGE R, DEGROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital [J]. Nature, 1997, 387(6630) : 253-260.
- [8] KNOX J B. Man's impact on his global environment [R]. California Univ., Livermore(USA) . Lawrence Livermore Lab, 1976.

[9] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ, 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.

[10] 张嘉宾. 关于西双版纳傣族自治州森林涵养水源功能的计量与评价[J]. *林业资源管理*, 1982: 29-33.

ZHANG J B. Research on the Forest Water Retention Function in Dai Autonomous Prefecture of Xishuangbanna [J]. *Forestry Resource Management*, 1982: 29-33.

[11] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态服务功能及其生态经济价值的初步研究 U]. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.

OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological- economic values [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613.

[12] 王小琳. 基于 InVEST 模型的贵州省水源涵养功能研究[D]. 贵州师范大学, 2016.

WANG X L. Modelling water conservation function base on the InVEST model: case studies in Guizhou [D]. *Guizhou Normal University*, 2016.

[13] LEH M D K, MATLOCK M D, CUMMINGS EC, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013 , 165: 6-18.

[14] GOLDSTEIN J H, CALDARONE G, DUARTE T K, et al. Integrating ecosystem-service trade-offs into land-use decisions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(19) : 7565-7570.

[15] 张海博. 基于 SEBS 与 SCS 模型的区域水源涵养量估算研究——以北京北部山区为例[D]. 中国环境科学研究院, 2012.

ZHANG H B. Estimation of regional water conservation based on SEBS and SCS model: a case study of mountainous area in northern Beijing [D]. *Chinese Research Academy of Environment Sciences*, 2012.

[16] 胡晓明. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能评估与模拟——以吉林省龙湾自然保护区为例[D]. 东北师范大学, 2015.

HU X M. Ecosystem services evaluation and simulation based on the InVEST model: case study in Longwan Nature Reserve, Jilin[D]. *Northeast Normal University*, 2015.

[17] TALLIS HT, RICKETTS T, GUERRY A D et al. InVEST 2. 5. 3 User' s Guide [M]. Stanford: The Natural Capital Project, 2003.

[18] 白杨, 初东, 田良, 等. 武汉城市圈的水源涵养功能重要性评价研究[J]. *地球信息科学*, 2014, 16(2): 233- 241.

BAI Y, CHU D, TIAN L, et al. Assessing the importance of water conservation function in Wuhan City Circle [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014, 16(2) : 233-241.

[19] 王雅, 蒙古军, 齐杨, 等. 基于 InVEST 模型的生态系统管理综述[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(12) : 3526-3532. WANF Y, MENG

J J, QI Y, et al. Review of ecosystem management based on the InVEST model [J]. Chinese Journal of Ecology 2015, 34(12) : 3526-3532.

[20]王纪伟,刘康,翁耐义.基于 InVEST 模型的汉江上游森林生态系统水源涵养服务功能研究[J].水土保持通报, 2014, 34(5) : 213-217.

WANG J W, LIU K, WENG N Y. Research on water conservation service function of forest ecological system in Upstream of Hanjiang River Based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5) : 213,217.

[21] HOYER R, CHANG H J. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization [J]. Applied Geography, 2014(53): 402-416.

[22] GOLDSTEINA H T, GOLDSTEIN J H, CALDARONE G, et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions [J]. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(19) : 7565-7570.

[23] JOHN W R, LINDA M, TOM H. OLIVER, et al. National scale evaluation of the InVEST nutrient retention model in the United Kingdom [J]. Science of the Total Environment, 2017 , 610-611(2018): 666-677.

[24] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究, 2016, 35 (4) : 664-676.

BAO Y B, LI T, LIU H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi province by InVEST model[J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 664-676.

[25] 文志,赵赫,刘磊,等.土地利用变化对海南土壤水源涵养功能的影响[J].应用生态学报, 2017, 28(12) 4025-4033.

WEN Z, ZHAO H, LIU L, et al. Effects of land use changes on soil water conservation in Hainan Island, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12) : 4025-4033.

[26] 陈姗姗,刘康,包玉斌,等.商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素[J].地理科学, 2016, 36(10) : 1546-1554.

CHEN S S, LIU K, BAO Y B, et al. Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(10): 1546- 1554.

[27] 王倩,魏巍,刘洁,等.江苏省水资源利用相对效率时间分异与影响因素[J].水土保持通报, 2017, 37(1): 308-314.

WANG Q, WEI W, LIU J, et al. Temporal change of relative efficiency of water resource use and influencing factors in Jiangsu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1) : 308-314.

[28] 操信春,束锐,郭相平,等.基于 BWSI 与 GWSI 的江苏省农业生产水资源压力评价[J].长江流域资源与环境, 2017, 26(6) : 856-864.

CAO X C, SHU R, GUO X P, et al. Water stresses evaluation of agricultural production in Jiangsu Province BWSI and

GWSI [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(6) : 856-864.

[29] 江苏省水利厅. 江苏省水资源公报 2014[EB/OL]. http://www.jswater.gov.cn/art/2015/6/18/art_1075_56767.html.

[30] 孙小银, 郭洪伟, 廉利姝, 等. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 669-679.

SUN X Y, GUO H W, LIAN L S, et al. The spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4) : 669-679.

[31] ZHANG L, HICKEL K, DAWES W R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration [J]. Water Resources Research, 2004, 40(2) : W02502.

[32] 马腾飞. 河北省经济发展与环境质量关系实证分析研究[D]. 燕山大学, 2013.

MA T F. The study on relationship of hebei province between economic development and environmental quality [D]. Yanshan University, 2013.

[33] 王鹏, 况福民, 邓育武, 等. 基于主成分分析的衡阳市 土地生态安全评价[J]. 经济地理, 2015, 35(1): 168- 172.

WANG P, KUANG F M, DENG Y W, et al. Assessment of land eco-security of the hengyang city on the principal component[J]. Economic Geography, 2015 , 35(1) : 168-172.