

# 基于参数本地化 InVEST 模型的安徽省 水源涵养功能研究

李莹莹<sup>1, 3</sup> 马晓双<sup>2, 3</sup> 祁国华<sup>1, 3</sup> 吴艳兰<sup>2, 31</sup>

(1. 安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 安徽大学 信息材料与智能感知安徽省实验室, 安徽 合肥 230601;

3. 安徽大学 湿地生态保护与修复安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

**【摘要】:** 水源涵养服务功能在生态系统服务功能中处于中心地位, 定量评估水源涵养功能可为区域生态环境质量的评价提供参考。基于参数本地化的 InVEST 模型对安徽省 2000~2019 年逐年的水源涵养时空变化及其不同气候条件下的影响因素差异进行分析。结果表明: (1) 20 年来, 安徽省水源涵养服务功能增强; (2) 水源涵养深度空间分布格局表现为南高北低, 钱塘江流域>长江流域>淮河流域; (3) 多年均产水深度为 763.1mm, 产水量为  $10.65 \times 10^{10} \text{m}^3$ , 多年均水源涵养深度为 193.7mm, 总量为  $26.8 \times 10^9 \text{m}^3$ ; (4) 各地类中, 草地产水能力最强, 林地的水源涵养能力最强; (5) 在干旱年 2001 年、正常年 2008 年、湿润年 2015 年, 各因子对水源涵养量的解释力度排序没有太大差异, 人为活动对于水源涵养服务功能的干预强度不断加大。

**【关键词】:** 水源涵养功能 时空格局 InVEST 模型 标准化降水蒸散发指数

**【中图分类号】:** P344 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)02-0313-13

生态系统不仅为人类提供了赖以生存的物质和环境, 更重要的是创造与维持了地球生态支持系统, 发挥了极其重要的生态服务功能<sup>[1]</sup>。由于自然生态系统被干预的强度不断加大, 生态系统结构以前所未有的速度发生着变化, 有关生态系统服务的研究备受关注<sup>[2]</sup>。水是生命之源, 驱动着无机环境和生物群落的稳定性与丰富度, 水在生态系统内运移、转换的过程中产生了多种服务效应, 例如抑制蒸发、调节径流、调洪削峰和涵养水源等<sup>[3]</sup>。水源涵养属于生态调节服务功能之一, 指一定时空范围和条件下, 生态系统将降雨保持在系统内的过程和能力, 在各项生态系统中处于中心地位, 对系统生产力、养分循环等其它功能都会产生影响, 是生态环境质量的指示器<sup>[4]</sup>。同时在全球性水资源短缺、地下水储量锐减、洪涝灾害的背景下, 空间可视化、定量化评估区域生态系统产水量、水源涵养功能成为资源环境与水文学研究的热点<sup>[5,6]</sup>。

由于不同学者对于水源涵养的内涵理解不同, 由此诞生了多种模型来定量评估生态系统水源涵养功能, 如林冠截留剩余量法、降水贮存量法、水量平衡法、多因子回归法等<sup>[7]</sup>。然而水源涵养功能具有较明显的时间空间尺度性特征, 以上各计量模型的

**作者简介:** 李莹莹(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境遥感. E-mail: liyy0917@163.com; 马晓双 E-mail: mxs88@163.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41701390)

区域适用性较差,不适于在大尺度、地形复杂、生态系统类型多样的区域进行长时序的应用<sup>[7]</sup>。由斯坦福大学、大自然保护协会、世界自然基金组织开发的 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型可对生态系统水源涵养功能定量和空间可视化评估,充分权衡土地利用类型、气候、地形、植被等因素。自发布以来,该模型被广泛应用于全球生态系统服务功能与价值评估中,并取得了良好的效果<sup>[8,9]</sup>。国外研究多侧重于流域产水量、产沙量的评估<sup>[10,11]</sup>,国内的相关研究集中于运用水量平衡法估算水源涵养量,进而分析其时空变化特征及影响因子<sup>[12,13]</sup>。然而,以上研究多集中于某一年水源涵养特征的分析,或是研究时间跨度较大但数据在时间上分布稀疏,易忽略气候异常年份的影响,无法客观描述其长期走势。不同气候条件下水源涵养量影响因素的差异研究更是鲜有出现。引入长时序高密度的数据,细致反映区域水源涵养功能的变化趋势,探究不同典型气候年影响因子对水源涵养功能作用程度的不同是本文研究重点。此外,以往研究通常根据研究区域季节性降水特征取经验值,或通过查阅产水量数据,根据已有的产水量数据对模型校验,从而确定 Zhang 系数,以上方法方便快捷,但未考虑到区域气候的异质性及产水量数据的可靠性<sup>[14,15]</sup>。因此,对模型参数进行本地化计算,是提升 InVEST 水源涵养模型适用性和准确性的关键之一<sup>[13]</sup>。

安徽省自然资源丰富,生态系统多样。长江、淮河流经本省,淮河过境水量有限,长江及其支流、钱塘江水系水资源丰沛。安徽省淮河以北为暖温带半湿润季风气候,淮河以南属亚热带湿润季风气候。受季风影响,天气多变,降水年内年际变化较大,洪涝旱灾频发<sup>[16]</sup>。准确评估水源涵养能力对区域自然灾害的治理具有十分重要的意义,同时为区域土地规划、确定分区整治提供参考<sup>[17]</sup>。2019 年《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》发布,安徽全省域被纳入长三角经济圈范围。作为长三角生态屏障以及联通中西部的重要开放枢纽,安徽省的生态环境状况对长江三角洲经济区的生态安全和资源支持具有特殊的重要性。为此,本文根据安徽省区域特性,对 InVEST 模型产水模块的系数进行本地化修正,进而利用其评估 2000~2019 年安徽省逐年水源涵养量,分析其时空变化特征,并根据典型气候年的划分,探讨不同气候条件下水源涵养影响因子对水源涵养功能作用程度的差异,以期为区域环境生态的规划建设提供参考。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区概况

安徽省地处中国华东地区,长江三角洲腹地(29° 41' N~34° 38' N,114° 54' E~119° 37' E),与苏、浙、鄂、豫、赣、鲁六省接壤。全省辖 16 个地级市,省域面积 14.01 万 km<sup>2</sup>,占全国的 1.45%。安徽省分属淮河、长江及钱塘江三个流域,根据江河分布,划分为淮北、淮南、江北、江南、钱塘江流域五个分区。安徽省地处中低纬度,地形主要包括淮北平原、江淮丘陵、皖南山区,地势南高北低。全省野生动植物资源丰富、种类繁多。降水具有季节性,夏季雨量占年降雨量的 40%~60%,四季分明,光照充足,年均气温 14℃~17℃。近 20 年全省年平均降水量在 761~1706mm,呈现南多北少的趋势。全省土地类型以耕地为主,农业生产在全国占有重要地位。

### 1.2 数据来源与处理

为了利用 InVEST 模型反演安徽省 2000~2019 年水源涵养功能信息,本研究需要获取和下载的数据包括产水模块数据和水源涵养模块数据等。

(1)产水模块数据包括降雨量、潜在蒸散发量栅格数据、土地利用图、土壤深度数据、植物可利用水量、流域和次流域矢量图、生物物理系数表。相关气象数据来源于《中国地面气候资料月值数据集》,包括安徽省内及其周边 35 个气象站点 2000~2019 年逐月降雨量数据、日最高气温、日最低气温、平均水汽压、2m 处风速、日照时数。对降雨量其进行克里金插值得到安徽省 20 年降雨量年际分布图,分辨率 1km,将年平均降雨量插值结果与安徽省水文局公布的年平均降雨量进行比较,结果如图 2,克里金算法降雨插值量和安徽省水文局公布的年平均降雨量具有很好的相关性。其余数据基于 Penman-Monteith 公式,借助 ET0calculator 软件进行计算区域气象站点月均潜在蒸散发量,对其进行克里金插值得到安徽省年均潜在蒸散发量栅格数据,分辨率 1km;2000~

2019 逐年土地利用数据为 MODIS 土地覆被产品 MCD12Q1 数据，下载自 NASA，该产品采用五种不同的土地覆盖分类方案，其中国际地圈生物圈计划 (IGBP) 土地覆盖分类系统用途较广，分类精度为 75%<sup>[18]</sup>，分辨率 500m，本研究选取此分类标准。在 ENVI 中，对 MCD12Q1 数据添加正弦曲线投影，利用 MRT 软件，通过裁剪和拼接得到研究区逐年土地利用数据；土壤深度数据采用北京师范大学发表的《面向陆面模拟的中国土壤数据集》<sup>[19]</sup>，该数据集中，土壤深度数据分为 8 层，将有效的土层厚度数据由 nc 格式转化为 geotiff 格式，在 ArcGIS 中叠加得到土壤深度数据，分辨率 1km；本研究中的植物可利用含水量根据土壤质地查找参数表获得<sup>[20]</sup>，所用的参数表数据是在土壤质地(砂土-壤土-粘土-有机质)百分比含量基础上根据周文佐提出的土壤有效含水量经验公式计算获得，对于组合土壤剖面数据来说，该经验公式模拟的土壤有效含水量与测量值之间的相关性达到了显著性水平，非线性拟合结果  $R^2$  达到 0.925<sup>[21]</sup>。周文佐研究指出：除青藏高原和沙漠地区以外的我国其它地区，植物可利用含水量处于 17.2%~21.2% 这一区间范围，本研究中安徽省植物可利用含水量均值为 18.5%，符合前人研究。土壤质地数据来源于世界土壤数据库，中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据，下载自寒区旱区科学数据中心，分辨率 1km；次流域矢量图依据数字高程模型 (DEM)，通过 ArcGIS 水文分析工具得到，经反复对比，将汇流累积阈值设为 80000 时，生成的河网与实际的最为吻合。所需的 DEM 数据来自地理空间数据云，分辨率 90m。生物物理系数表中的参数基于已有研究获得，具体见表 1<sup>[13,17,23]</sup>。

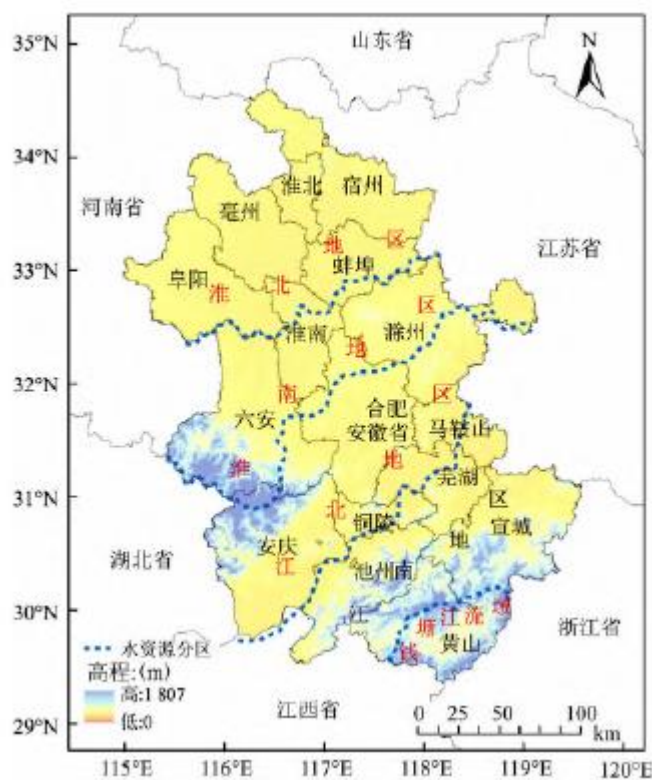


图 1 研究区示意图

表 1 产水模块生物物理参数表

地类	lucode	kc	root_depth	LULC_veg
常绿针叶林	1	1	7000	1
常绿阔叶林	2	1	7000	1
落叶阔叶林	4	1	7000	1

灌木林	5	0.9	5000	1
混交林	8	1	7000	1
草地	10	0.65	2600	1
湿地	11	0.65	1000	0
农田	12	0.65	2000	1
城市建筑区	13	0.1	1	0
农用田自然植被拼接	14	0.65	2100	1
稀疏植被	16	0.8	5100	1
水	17	0	1	0

表中:Lucode 为地类编号,kc 为每一地类对应的植被蒸散系数,root\_depth 为每一地类植物的根系深度,单位为 mm, LULC\_veg 的赋值是既定规则, 植被覆盖地类(不包括湿地)赋值为 1,其他土地利用类型(包括湿地、城市用地、水体)赋值为 0.

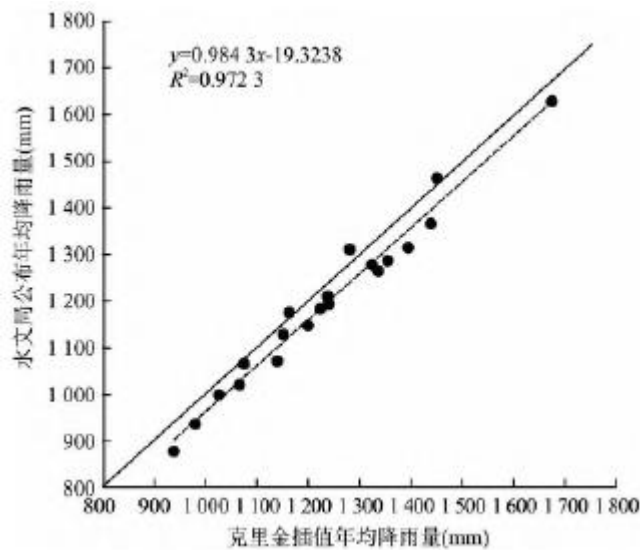


图 2 克里金插值方法年均雨量计算值与官方年均降雨量的相关性分析结果

(2) 水源涵养计算模块数据包括土壤饱和导水率、流速系数和地形指数。土壤饱和导水率基于土壤质地数据,利用 NeuroTheta 软件计算得出、流速系数根据土地利用类型取经验值<sup>[23]</sup>,地形指数(TI)是一种基于 DEM 对流域内产流能力量化的指标,其值越大,意味着该区域的土壤越容易达到饱和而产流,即表示土壤的含水量越高<sup>[22]</sup>。

(3) 驱动因子分析模块:对安徽省年度植被指数(NDVI)空间数据进行反演,得到逐年的植被覆盖度栅格数据。夜间灯光数据为 DMSP/OLS 夜间灯光影像,能综合反映通道、居民地等与人口、城市等因子分布密切相关的信息,目前已被广泛应用到社会经济、环境能源等领域的研究<sup>[24]</sup>。NDVI 数据与夜间灯光影像均下载自资源环境科学与数据中心,分辨率 1km。模型计算中所需的数据与分析使用数据均采用 WGS-1984 地理坐标系,UTM 投影坐标。栅格数据均重采样到 90m 分辨率。

表 2 基础数据及其来源

	来源
土地利用/覆盖	从 NASA 官网获取 ( <a href="https://search.earthdata.nasa.gov/">https://search.earthdata.nasa.gov/</a> )
气象数据	用于运算出年度降雨量及潜在蒸散发量, 下载自中国气象数据网 ( <a href="http://data.cma.cn/">http://data.cma.cn/</a> )
土壤深度	获取自国家青藏高原科学数据中心 ( <a href="http://westdc.westgis.ac.cn/">http://westdc.westgis.ac.cn/</a> )
土壤质地	下载自寒区旱区科学数据中心 ( <a href="http://westdc.westgis.ac.cn/">http://westdc.westgis.ac.cn/</a> )
DEM	为 SRTMDEM90M 分辨率数据类型, 从地理空间数据云获取 ( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )
NDVI	中国年度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集, 下载自资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
夜间灯光指数	下载自资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )

## 2 研究方法

### 2.1 基于 InVEST 模型水源涵养功能评估

InVEST 模型产水模块是一种基于水量平衡的估算方法, 以栅格为单元的降雨量减去实际蒸散发量后的水量即为产水量, 产水量通过地形、土壤饱和和导水率等因素进行校正, 即为区域的水源涵养量<sup>[26]</sup>。InVEST 模型综合了地形因子和土壤透水性差异等因素对水源涵养量进行评估, 使结果更为科学, 该模型参数调整灵活、评估结果空间表达性强<sup>[26]</sup>。具体计算公式如下<sup>[27]</sup>:

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

式中:  $Y_{(xj)}$  为第  $j$  类土地被覆栅格  $x$  的产水量 (mm);  $AET_{(xj)}$  为第  $j$  类土地被覆栅格  $x$  的实际蒸散发量 (mm);  $P_{(x)}$  为栅格  $x$  的降雨量 (mm)。其中:

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

式中:  $\omega_{(x)}$  是表征流域特征的非物理参数;  $R_{(xj)}$  为潜在蒸散发量与降雨量的比值, 也称为干旱系数, (2) 式中各参量计算公式如下:

$$R_{(x)} = \frac{k \cdot ET_0}{P_{(x)}} \quad (3)$$

$$\omega = Zhang \frac{AWC_{(x)}}{P_{(x)}} \quad (4)$$

$$AWC_{(x)} = \frac{MIN(\text{MaxSoilDepth}_{(x)}, \text{RootDepth}_{(x)}) \cdot PAWC_{(x)}}{PAWC_{(x)}} \quad (5)$$

式中： $ET_0$ 为潜在蒸散发量，或称为参考蒸散发量(mm)； $k$ 为某种植被类型的蒸散系数； $AWC_{(x)}$ 为植被有效利用水含量(mm)； $\text{MaxSoilDepth}_{(x)}$ 表示最大土壤深度(mm)； $\text{RootDepth}_{(x)}$ 是最大根系限制深度(mm)； $PAWC_{(x)}$ 为植物可利用水含量(mm)。产水量获得之后，便可得到水源涵养量，水源涵养量计算模型如下。

$$Retention = MIN\left(1, \frac{249}{Velocity}\right) \cdot MIN\left(1, \frac{0.9 \cdot TI}{3}\right) \cdot MIN\left(1, \frac{Ksat}{300}\right) \cdot Y_{(x)} \quad (6)$$

$$TI = \lg\left(\frac{DrainageArea}{SoilDepth \cdot PercentSlope}\right) \quad (7)$$

式中： $Retention$ 为水源涵养量(mm)； $Y_{(x)}$ 为产水量(mm)； $Velocity$ 指流速系数； $Ksat$ 为土壤饱和导水率(mm/d)； $TI$ 为地形指数； $DrainageArea$ 指集水区栅格数量； $SoilDepth$ 为土壤深度(mm)； $PercentSlope$ 为百分比坡度。

## 2. Zhang系数的本地化计算

Zhang是生态水文参数，也称季节常数，用于表征区域气候的季节性特征、降雨强度以及地形特征，取值范围为 $1 \sim 30$ <sup>[27]</sup>。InVEST模型需要输入的参数中，除Zhang系数外其余数据的来源及运算方法均较为成熟，Zhang系数算法却不尽相同。相似研究中多以降水的季节性特征取值，如冬季降水集中地区Z系数取10，夏季降水集中地区Z系数取1<sup>[28]</sup>。然而不同的年份降雨特征不同，取经验值的方法缺乏适用性。通过试验得到，模型运行得到产水量数值随Zhang系数的增大而减小。InVEST模型官方使用手册提到干旱指数较小的地区，模型结果受季节参数Zhang系数影响越大。本文的研究区域安徽省地处南北交界，降雨时空分布不均，所以实现Zhang系数本地化更有必要。InVEST模型官方使用手册中推荐用 $\tilde{\omega}$ 计算Zhang系数的公式如下<sup>[27]</sup>：

$$Zhang = \frac{(\tilde{\omega} - 1.25) \cdot P}{AWC} \quad (8)$$

式中： $P$ 和 $AWC$ 分别表示研究区年平均降水量和年平均植物可利用水含量， $\tilde{\omega}$ 反映了流域特征对降雨分配给实际蒸散发和径流比例的影响，1.25为 $\tilde{\omega}$ 的基数，5为 $\tilde{\omega}$ 的上限。在原始布迪科曲线中， $\tilde{\omega}=2.76$ <sup>[29]</sup>。关于确定 $\tilde{\omega}$ 经验值的相关研究很多，本文使用Xu等<sup>[30]</sup>2013发表的计算模型，该模型在全球数个大小流域均得到良好的验证<sup>[30]</sup>。

$$\begin{aligned} \omega = & 5.05722 - 0.09322 \text{lat} + 0.13085 \text{CTI} + \\ & 1.31697 \text{NDVI} + 0.00003 \text{A} - \\ & 0.00018 \text{elev} \end{aligned} \quad (9)$$

式中：lat 为流域中心的纬度；CTI 为复合地形指数，也称地形湿度指数，为区域保水性能的指标，其值越大，代表能较长时间的保持水分；NDVI 为归一化植被指数；A 为流域面积(km<sup>2</sup>)；elev 为高程(m)。通过上式，即可完成 Zhang 系数本地取值。

采用的模型以流域为计算单元。安徽省分为淮河、长江、钱塘江流域，计算参量中的降雨量、NDVI、植物有效含水量、地形指数均采用各自流域内年均值，由各流域面积所占比例取权重，综合计算得出安徽省 Zhang 系数。如图 3 所示，安徽省 Zhang 系数在 5.3~10.8 之间浮动，20 年间，平均值为 7.8。Zhang 系数越高，表示当年的降雨事件越频发。已有研究指明：热带流域季节常数 Zhang 值趋向 4，温带流域季节常数 Zhang 值趋向 9<sup>[31]</sup>，本文研究区气候类型属于温带，所以季节常数 Zhang 值应大于 4，并接近 9。已有实测数据得出同为温带气候的太湖西苕溪流域的季节常数 Zhang 值为 6.5<sup>[32]</sup>。综合考虑，本研究中安徽省季节常数 Zhang 值取 7.8 比较合理。

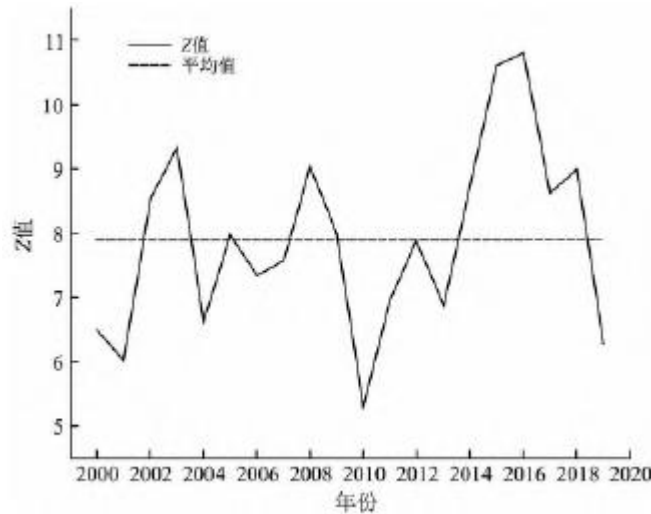


图 3 2000~2019 年安徽省 Zhang 系数变化

### 2.3 变化趋势分析与显著性检验

使用一元线性回归法评价 2000~2019 年安徽省水源涵养量的变化趋势。对于栅格数据，每个像元都相应具有 20 年的时间序列数值，以单个像元的变化趋势反映空间演变特征<sup>[24]</sup>，公式如下：

$$\text{Slope} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n i \cdot \text{Retention}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{Retention}_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (10)$$

式中：Slope 为线性倾向率，值大于 0 表示水源涵养功能在研究时序内处于改善的状态，小于 0 则为降低；n 为年数；i 为

年份序列。

研究采用 Theil-Sen median 趋势分析<sup>[33]</sup>耦合 Mann-Kendall 检验方法<sup>[34]</sup>评价研究时序水源涵养功能退化或增加趋势的显著性。该做法能有效剔除异常值的干扰, 样本数据也无需服从特定的分布, 可区分某一变化过程是处于自然波动还是存在确定的变化趋势<sup>[33,34]</sup>, 并能综合评估研究区显著性变化的时空特征。本文在置信水平  $\alpha = 0.05$  上判断水源涵养量变化趋势的显著性, 当检验结果的绝对值大于 1.96, 则为显著变化, 反之表示变化不显著<sup>[24]</sup>。

## 2.4 基于地理探测器 (Geographical Detector) 的驱动因子分析

空间分异性是空间数据的一大特性, 地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法, 其核心思想是基于这样的假设: 如果某个自变量对某个因变量有重要影响, 那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性<sup>[35]</sup>。地理探测器包括 4 个探测器。为了探究水源涵养量典型驱动因子的影响程度, 本文利用因子探测、交互作用探测, 以干旱年、正常年、湿润年的水源涵养量作为因变量 Y, 以对应年份的降雨量、土质、植被覆盖度等自然因素及土地利用类型和夜间灯光指数等人为因素作为自变量 X。

### (1) 因子探测:

探测某因子 X 在多大程度上解释了 Y 的空间分异性, 用 q 值表示, q 值越大, 表示因子 X 对变量 Y 的解释力越强, 反之, 则越弱<sup>[36]</sup>。其取值范围为 [0, 1]。

### (2) 交互因子探测:

这部分主要是探测不同因子  $X_i$  (降雨量、土质、植被覆盖度、土地利用类型和夜间灯光指数) 两两交互对变量 Y (水源涵养量) 的影响作用, 先计算单因子对变量解释力度, 再计算两因子相交时的 q 值, 以此判断交互作用类型<sup>[37]</sup>。基于 ArcGIS 平台, 对安徽省域矢量数据创建渔网, 选取研究区均匀分布的 5609 个随机点代表总体, 依据随机点提取的自变量与因变量数值已剔除异常值。

## 3 结果与分析

### 3.1 2000~2019 年安徽省水源涵养量空间分布特征

应用 InVEST 模型产水模块对安徽省 2000~2019 年水源涵养量进行评估, 如图 4 所示。安徽省不同年份的水源涵养深度高低值分布位置变化不大, 高值区主要位于安徽省南部、西南部, 低值区位于北部。从流域分区来看, 钱塘江流域水源涵养深度高于淮河流域, 长江流域最低。这与安徽省降水分布南多北少, 及土地覆盖类型存在明显的南北差异有着密切的关系, 安徽省南部以山林地为主, 树种多样, 植被垂直结构分明, 易产生水源涵养效应, 北部多为耕地, 土壤板结, 植被覆盖类型单一, 水源涵养能力较弱。20 年间, 水源涵养深度极值出现在 2016 年, 为 3010.74mm; 在 2007 年最低, 为 1009.78mm。相对应的全省年平均水源涵养深度分别为 314.6、159.09mm。从空间分布差异的角度来看, 2003 年全省水源涵养量分布较为均匀, 2019 年水源涵养量南北差异最为明显。这与 2019 年安徽省江南降雨量接近常年, 而江北大部偏少 2~5 成有直接关系。不同于往年的分布, 2013 年淮北地区水源涵养深度高于淮南, 2013 年安徽省遭遇多次干旱, 淮河以南受少雨和蒸发量大叠加影响, 旱情较为严重。这与 2013 年水源涵养深度分布格局较为吻合。

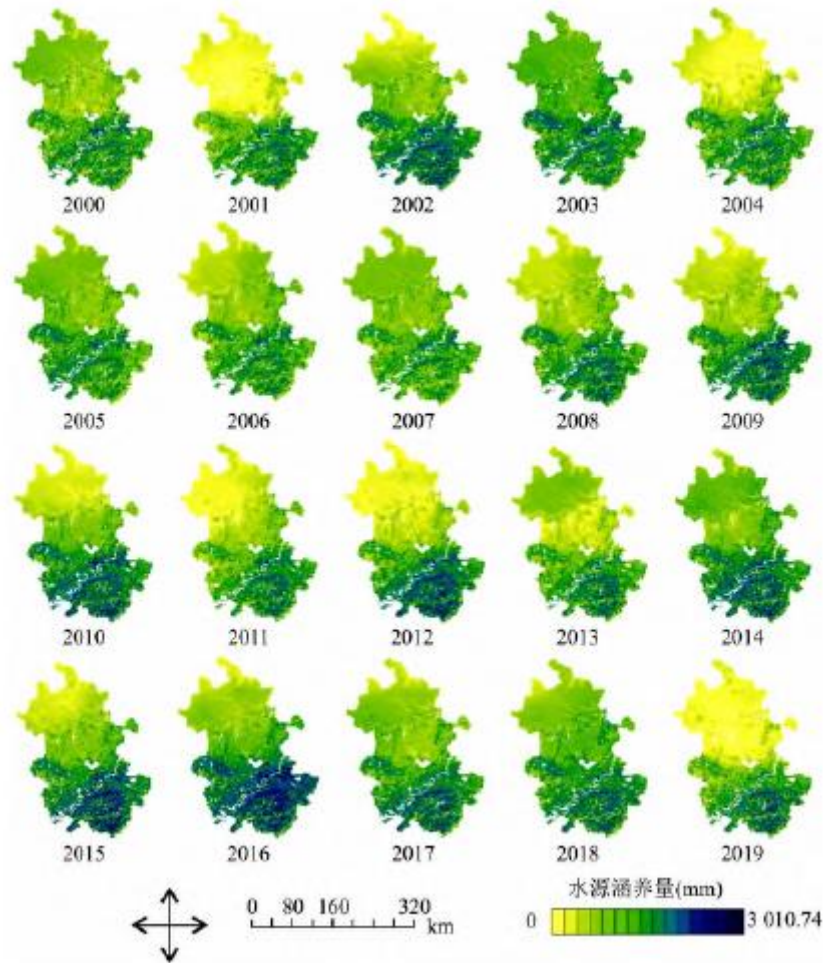


图 4 2000~2019 年安徽省水源涵养服务时空分布

### 3.2 2000~2019 年安徽省水源涵养量时间分布特征

在水源涵养深度时空分布的基础上，对安徽省 20 年来水源涵养功能进行量化分析，并添加年平均产水量深度及年平均降雨量作为对照。降雨是生态系统涵养水源的直接来源，为了直观反映降雨量转化为水源涵养量的效率，本文定义一种水源涵养系数，其取值为单位面积水源涵养深度与降雨量的比例。其内涵为区域生态系统涵养降雨的能力。

各参量变化趋势如图 5 所示。2000~2019 年安徽省多年平均降雨量为 1234.75mm，2001 年最低，为 936.32mm，2016 年达到峰值 1674.65mm。年平均产水量深度、水源涵养深度的时间变化趋势与降雨量相似。20 年间，安徽省多年均产水深度为 763.1mm，产水量为  $10.65 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ；多年均水源涵养深度为 193.7mm，总量为  $26.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，2000~2016 年，安徽省年平均水源涵养深度上升趋势较明显，2016~2019 年有所下落。水源涵养系数在 0.137~0.188 之间波动，其中，2007 年最低，为 0.137；2016 年达最大值 0.188，间接反映了 2016 年生态系统水源涵养效率较高。

图 6 定量评价了安徽省不同地区及地类 20 年来水源涵养深度的波动趋势。不同地区的平均水源涵养深度表现为由南向北递减，钱塘江流域(355.86mm) > 江南地区(337.19mm) > 江北地区(210.43mm) > 淮南地区(136.92mm) > 淮北地区(78.5mm)；钱塘江流域产水深度与江南地区整体上存在明显的空间差异，但水源涵养深度却仅略高于江南，原因在于钱塘江流域处于山区，山大沟深，地形指数高，容易达到饱和而产流，土壤层薄，储存降水能力较次，其产流功能强，水源涵养能力较弱。在 2003~2007、2009、

2016 年钱塘江流域与江南地区的降雨量相差不大，受其地形特征影响，水源涵养深度略低于江南地区。地区内地类的空间分布也存在显著差异(表 3)。在地类水源涵养深度的变化中，林地(334.6mm)>草地(289.6mm)>湿地(126.3mm)>农田(94.66mm)。林地和农田对安徽省水源涵养功能贡献率占优，分别为 59.6%和 24.8%，主要原因是草地面积仅占安徽省域面积 7%，农田面积占比 25%。安徽省林地面积占全省面积 34%，59.3%分布在钱塘江流域与江南地区，在这两地区中，林地皆为当地优势生态系统，因此江南地区、钱塘江地区水源涵养深度的变化曲线与林地相似。安徽省草地面积的 50.3%分布于江北地区，48.6%的农田分布于淮北地区，淮北地区农田占比高达 93.4%，表现出江北地区水源涵养深度与草地的、淮北地区水源涵养深度与农田的波动趋势具有相近的特征。在相同的气候背景下，土地利用类型在地区水源涵养功能中发挥主体作用。

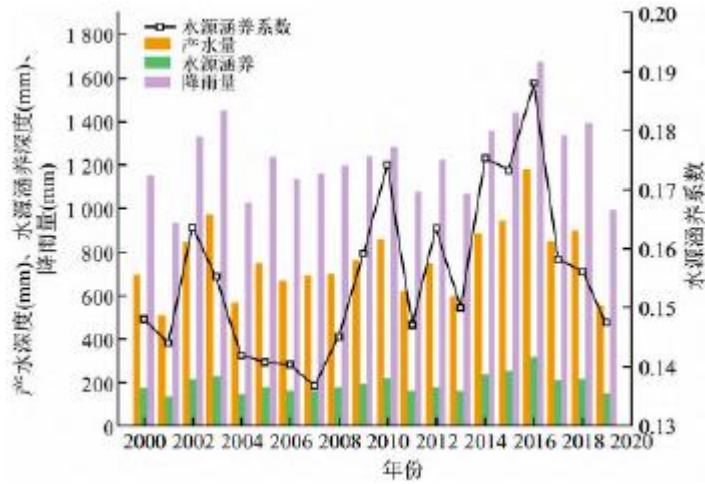


图 5 产水深度、水源涵养深度、降雨量及水源涵养系数变化

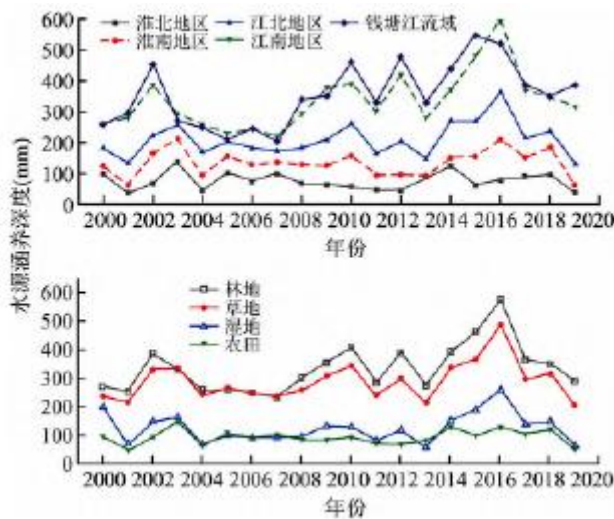


图 6 各分区、地类水源涵养深度变化

表 3 各地区主要地类占比

	淮北地区	淮南地区	江北地区	江南地区	钱塘江流域	总和
--	------	------	------	------	-------	----

林地占比(%)	5.3	13	22.4	46.2	13.1	1
草地占比(%)	4.8	3.3	50.3	35.9	5.7	1
农田占比(%)	48.6	24.1	23.3	3.7	0.3	1

水源涵养系数表示栅格涵养水源能力或效率。下垫面是影响产水效率与水源涵养效率的重要因素，不同地类的产水系数与水源涵养系数如图 7 所示。2000~2019 年间，平均产水系数表现为草地(0.644)>林地(0.611)>农田(0.6)>湿地(0.451);平均水源涵养系数表现为林地(0.216)>草地(0.214)>湿地(0.096)>农田(0.091);产水系数到水源涵养系数减小的百分比排序为农田(84.8%)>湿地(78.71%)>草地(66.77%)>林地(64.65%)。农田与湿地从产水系数到水源涵养系数下跌显著，主要是由于农田与湿地的流速系数较大，雨水单位时间流动距离较长，易形成地表径流，不利于存储、保持降水。在产水系数方面，草地高于林地，而林地的水源涵养系数却高于草地，原因在于，林地的地上部分如林冠层、林下植被层、枯枝落叶层是涵养水源的重要环节，可减弱雨水对土壤的直接冲刷，保护土壤结构<sup>[38]</sup>。林地土壤层孔隙度大，容重小，渗透性能好，水土流失得到有效控制，其水源涵养能力较强。

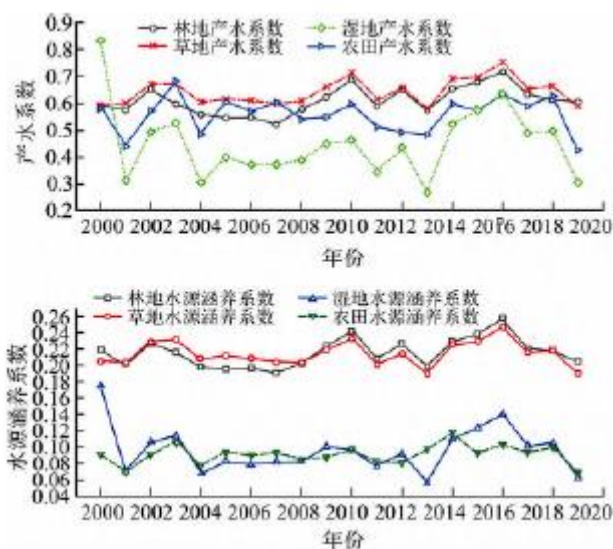


图 7 各地类产水系数、水源涵养系数变化

### 3.3 时空变化趋势与显著性分析

采用 slope 趋势分析法、Theil-Sen 中值趋势分析耦合 Mann-Kendall 检验方法及对安徽省 2000~2019 年水源涵养深度进行线性回归与变化趋势显著性分析，结果如图 8 所示。从图 8(A)中，整体上从北向南呈现减少-增加的分布格局。20 年间，水源涵养深度增加的面积为 99674.4km<sup>2</sup>，占研究区面积的 71.4%;水源涵养深度降低的面积为 33925.6km<sup>2</sup>，占总面积的 28.6%。降低的区域主要分布于阜阳市、亳州市、淮北市北部、宿州市北部、六安市北部及淮南市中部。

将 Theil-Sen 中值趋势分析的分级结果和 Mann-Kendall 检验的分级结果进行叠加，得到像元尺度上水源涵养功能的变化趋势数据，并将结果划分为 5 种变化类型：显著退化、轻微退化、稳定不变、显著改善、轻微改善。实验结果显示，安徽省从 2000~2019 年间，水源涵养功能整体上改善，各个状态的面积所占比例从大到小依次为：轻微改善(44.75%)>轻微退化(26.48%)>显著改善(19.83%)>稳定不变(7.57%)>显著退化(1.37%)。水源涵养功能变化具有明显的区域差异，从空间分布来看，具有如下特点：

(1) 显著退化的区域零星分布在长江流域，主要包括六安市大别山区边界，安庆市大别山区边界，芜湖市与合肥市交界处群山边缘，宣城市区、芜湖市湾沚区、合肥市区外围、马鞍山市区周围。主要是由于人类活动频繁，城市扩张加速，建筑用地、农田侵占了草地、林地，水源涵养功能显著降低。(2) 轻微退化区域主要集中分布在六安市北部、淮北市中部、阜阳市北部、亳州市、蚌埠市北部、宿州市北部，轻微退化的区域分布具有明显的聚集性，较大程度与降雨量的减少有关。(3) 轻微改善的区域占安徽省域面积近一半，广泛分布于淮南地区、江北地区和江南地区，这是由于这些区域土地覆被状态较为稳定，植被生长状态良好，水源涵养能力提升。(4) 显著改善的区域分布鲜明，集中位于皖南山区。除了与得天独厚的生态环境、气候条件有关，与安徽省划定新安江上游水源涵养及水土保持生态保护红线的举措密不可分。严格保护天然林，合理利用土地，实施退耕还林，生物与工程措施相结合，控制水土流失，提高水源涵养能力，逐步恢复生态系统结构和功能。利用 Sen 中值趋势分析耦合 Mann-Kendall 法计算的安徽省水源涵养功能变化趋势和线性回归方法的结果比较相符，两种方法均可以广泛应用到其他区域的水源涵养功能变化趋势分析中。

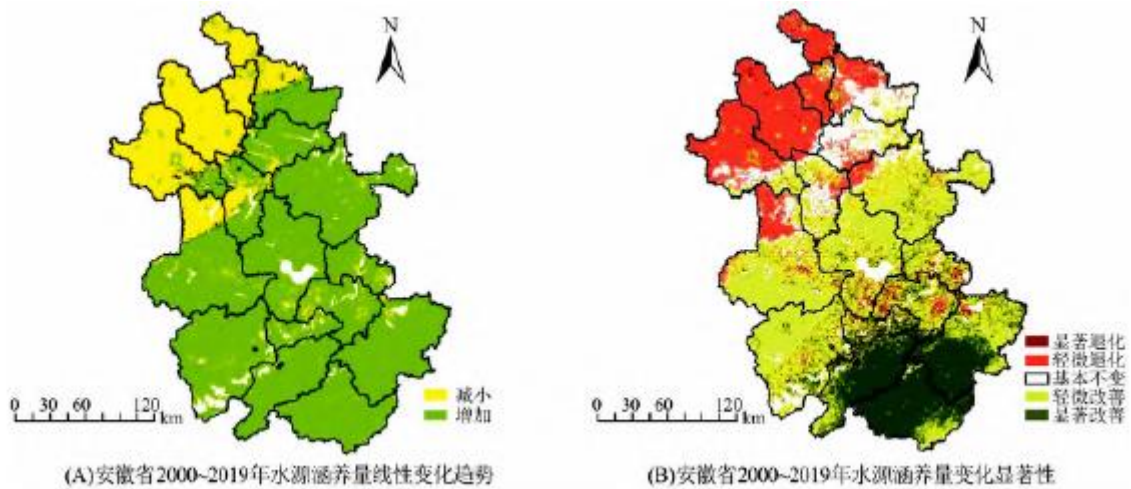


图 8 水源涵养量线性变化趋势与显著性图

### 3.4 不同气候代表年份驱动因子分析

#### 3.4.1 典型气候年划分

引入标准化降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 来划分安徽省 2000~2019 年气候干旱/湿润状况。SPEI 是定义气候干旱程度的指标，由 Vicente-Serrano 等在标准化降水指数的基础上引入潜在蒸散项构建<sup>[39]</sup>。该指数适用于气候变暖背景下气候干旱监测与评估，在全球各区域的应用检验中得到了很好的验证<sup>[40, 41]</sup>。干旱等级划分标准见表 4。

表 4 SPEI 对应的干旱/湿润等级划分

SPEI 数值	$\leq -2$	$[-2, -1.5)$	$[-1.5, -1)$	$[-1, 1)$	$[1, 1.5)$	$[1.5, 2)$	$\geq 2$
干旱等级	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	正常	轻度湿润	中度湿润	重度湿润

SPEI 指数具有多时间尺度的优势, 计算尺度通常有 3、6、12 个月。以 12 个月为计算步长, 通过计算安徽省内的 2000~2019 月平均降雨量和潜在蒸散发量, 得到安徽省气候干旱指数时间变化特征, 如图 9 所示。20 年间, 安徽省未出现极端干旱的年份, 2016 年为极端湿润年份。正常年份占比 55%, 干旱年份占比 30%, 湿润年份占比 15%。为了研究不同气候年份水源涵养功能影响因子的差异情况, 在此选取干旱气候代表年份 2001 年, 正常气候年 2008 年, 湿润气候年 2015 年来进行驱动因子分析。

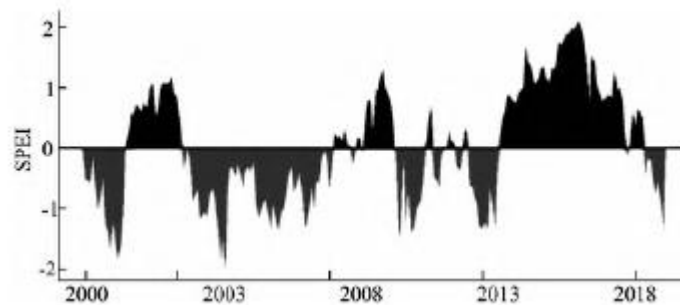


图 9 2000~2019 年安徽省 SPEI 年际变化

### 3.4.2 驱动因子分析

利用地理探测器因子探测部分对 3 种典型气候代表年份进行水源涵养功能驱动因子分析, 将自变量  $X$  归纳为自然因素与人文因素, 自然因素包括年降雨量、年实际蒸散发量、植被覆盖度、土壤类型; 人文因素包括土地利用类型与夜间灯光指数。表 5 为 2001、2008、2015 年各因子  $q$  值。在不同的气候条件下, 各因子对水源涵养量的解释力度  $q$  值排序没有太大差异。大多均表现为降雨量>土地利用类型>实际蒸散发>夜间灯光指数>土壤类型>植被覆盖度。纵向角度来看, 降雨量对于水源涵养功能的影响在湿润年大于正常年与干旱年, 实际蒸散发的影响力在正常年大于湿润年和干旱年。人文因子随着年份推移,  $q$  值增大, 说明人为活动对于水源涵养服务功能的干预强度不断加大。值得注意的是, 植被覆盖度的驱动力度最小, 这与以往有些研究不符。原因可能为安徽省植被覆盖度以淮河和长江为界表现为南北高中间低的分布, 沿淮淮北、皖南山区和大别山区较高, 江淮的丘陵地区较低。而沿淮淮地区降雨量、土壤饱和和导水率与土壤深度小于江淮地区, 实际蒸散发量高于江淮地区, 致使淮地区水源涵养功能低于江淮地区, 与植被覆盖度的分布差异相反。

### 3.4.3 影响因子交互作用分析

湿润年 2015 年的降雨量与实际蒸散发交互作用对水源涵养功能影响力度最大, 水源涵养变化的空间异质性受气候差异影响大于下垫面类型。任何两因子的交互作用对水源涵养的影响都要大于一个因子的单独作用。不同气候条件下, 因子交互作用对因变量的驱动程度排序不同。此外, 2001 年降雨量 $\cap$ 植被覆盖度为双因子非线性增强, 其余各气候条件下所有因子交互作用结果类型均为双因子增强(表 6)。因此, 水源涵养过程比较复杂, 其空间分布格局是各因子相互交织作用的结果, 在气候处于自然变化的情况下, 改变下垫面类型, 如植树造林, 优化土地利用结构, 是增强生态系统调节功能的重要途径。

此外, 本文模型的少量参数, 如土壤数据、DEM 数据, 使用的是某一固定年份的数据, 而非整个研究时段内的逐年数据, 使得水源涵养量的反演精度会受影响。并且, 生态系统水源涵养功能与土壤保持、土壤侵蚀关系密切, 降雨量达到一定强度必然改变土壤结构, 引起水土流失, 从而影响水源涵养功能。在今后的研究中, 耦合水源涵养功能与水土保持功能探究降雨量对水源涵养功能作用的最佳区间是进一步值得深入的方向。

表 5 各气候代表年份水源涵养功能驱动因子  $q$  值

q	降雨	实际蒸散发	土地利用类型	植被覆盖度	夜间灯光指数	土壤类型
干旱年 2001	0.241	0.126	0.175	0.040	0.095	0.110
正常年 2008	0.323	0.240	0.270	0.012	0.163	0.109
湿润年 2015	0.362	0.236	0.271	0.020	0.167	0.120

表 6 各气候代表年份水源涵养功能驱动因子的交互作用

	降雨量	实际蒸散发	土地利用类型	植被覆盖度	夜间灯光指数	土壤类型
2001 降雨量	/					
2008	/					
2015	/					
2001 实际蒸散发	0.283	/				
2008	0.458	/				
2015	0.487	/				
2001 土地利用类型	0.271	0.220	/			
2008	0.350	0.402	/			
2015	0.393	0.397	/			
2001 植被覆盖度	0.281	0.155	0.210	/		
2008	0.330	0.249	0.281	/		
2015	0.371	0.250	0.284	/		
2001 夜间灯光指数	0.253	0.135	0.184	0.118	/	
2008	0.337	0.254	0.275	0.174	/	
2015	0.374	0.249	0.277	0.179	/	
2001 土壤类型	0.301	0.225	0.240	0.138	0.179	/
2008	0.340	0.342	0.304	0.118	0.240	/
2015	0.381	0.346	0.322	0.134	0.246	/

#### 4 结论

(1) 20年间,安徽省水源涵养功能空间分布特征变化不大,表现为由北向南递增;多年均水源涵养深度为193.7mm,总量为 $26.8 \times 10^9 \text{m}^3$ ;安徽省生态系统水源涵养效率在0.137~0.188之间波动;草地产水能力最强,林地的水源涵养能力最强。在相同的气候条件下,土地利用类型对水源涵养功能的影响起主导作用。

(2) 水源涵养功能的变化趋势在空间分布上存在显著差异,水源涵养功能降低的地区主要分布在淮河以北地区,约占总面积的28.6%,增加的地区位于淮河以南,约占研究区面积71.4%,其中,呈轻微改善的面积最大,占研究区总面积44.75%;安徽省水源涵养与水土保持生态红线划分举措成果初显。

(3) 在不同的气候条件下,降雨量均为影响水源涵养功能的第一要素,其驱动力度与气候湿润程度成正比;安徽省水源涵养功能与植被覆盖度相关性低;人为活动对于水源涵养服务功能的干预强度不断加大。

#### 参考文献:

- [1] NUNEZ L, NAHUELHUAL C, OYAIZU. Forests and water: The value of native temperate forests in supplying water for human consumption[J]. *Ecological Economics*, 2006, 58(3): 606-616.
- [2] 王蓓, 赵军, 仲俊涛. 2005-2015年石羊河流域生态系统服务时空分异[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 209-220.
- [3] 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.
- [4] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 16-22.
- [5] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 256-260.
- [6] CHEN L, XIE G D, ZHANG C S, et al. Modelling ecosystem water supply services across the Lancang River Basin[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(4): 322-327.
- [7] 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.
- [8] SHAW M R, PENDLETON L, CAMERON D R, et al. The impact of climate change on California's ecosystem services[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(s1): 465-484.
- [9] SÁNCHEZ-CANALES, MARÍA, LÓPEZ BENITO, et al. Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 440: 140-153.
- [10] MARQUES M, BANGASH R F, KUMAR V, et al. The impact of climate change on water provision under a low flow regime: A case study of the ecosystems services in the Francoli River basin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 263(1): 224-232.
- [11] PESSACG N, FLAHERTY S, BRANDIZI L, et al. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 537: 225-234.

- 
- [12]王玉纯, 赵军, 付杰文, 等. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异[J]. 生态学报, 2018, 38(13):4637-4648.
- [13]赵亚茹, 周俊菊, 雷莉, 等. 基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12):3789-3799.
- [14]吕乐婷. 基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4):144-150, 157.
- [15]刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. 生态学报, 2020, 40(17):6161-6170.
- [16]王国强, 徐威, 吴道祥, 等. 安徽省环境地质特征与地质灾害[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1):164-164.
- [17]顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 等. 近 15a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(11):2453-2462.
- [18]郝莹莹, 罗小波, 仲波, 等. 基于植被分区的中国植被类型分类方法[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(2):315-323.
- [19]上官微, 戴永久. 面向陆面模拟的中国土壤数据集[DS]. 国家青藏高原科学数据中心, 2013.
- [20]于焯婷. 针对水原涵养功能的汉江流域生态修复分区及植被优化配置[D]. 南京信息工程大学, 2018.
- [21]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]. 南京农业大学, 2003.
- [22]邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析[J]. 地理科学进展, 2002(2):103-110.
- [23]陈姗姗. 南水北调水源区水源涵养与土壤保持生态系统服务功能研究[D]. 西北大学, 2016.
- [24]赵维清, 李经纬, 褚琳, 等. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(20):7722-7736.
- [25]孙小银, 郭洪伟, 廉丽姝, 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.
- [26]谢余初. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统服务时空变化研究[D]. 兰州大学, 2015.
- [27]TALLIS H T, RICKETTS T, GUERRY A D et al. InVEST 2.5.3 User' s Guide[M]. Stanford:The Natural Capital Project, 2003.
- [28]李盈盈, 刘康, 胡胜, 等. 陕西省子午岭生态功能区水源涵养能力研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3):636-642.
- [29]LIANG L, LIU Q. Streamflow sensitivity analysis to climate change for a large water-limited basin[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4):1767-1774.
- [30]XU X, LIU W, SCANLON B R, et al. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(23):6123-6129.

- 
- [31]王保盛, 陈华香, 董政, 等. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 484-498.
- [32]ZHANG C, LI W H, ZHANG B, et al. Water yield of xitiaoqi river basin based on InVEST Modeling[J]. Journal of Resources & Ecology, 2012, 3(1): 50-54.
- [33]BO-FENG[J]C. Advance and evaluation in the long time series vegetation trends research based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2009.
- [34]TOSIC I. Spatial and temporal variability of winter and summer precipitation over Serbia and Montenegro[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2004, 77(1/2): 47-56.
- [35]王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [36]WANG J F, ZHANG T L, FU B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.
- [37]SHI T, HU Z, SHI Z, et al. Geo-detection of factors controlling spatial patterns of heavy metals in urban topsoil using multi-source data[J]. Science of the Total Environment, 2018, 643(DEC. 1): 451-459.
- [38]陈卓梅, 郑郁善, 黄先华, 等. 秃杉混交林水源涵养功能的研究[J]. 福建林学院学报, 2002(3): 266-269.
- [39]VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Climate, 2010, 23(7): 696-718.
- [40]DUAN Y, WANG W, CAI X J. Applied analyses on palmer, SPEI and CI indices of drought process in Yangtze-Huaihe River Basins during Winter of 2010/Spring of 2011[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 1126-1139.
- [41]庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(5): 617-625.