

汉江流域产水量时空格局及影响因素研究

胡砚霞^{1,2} 于兴修^{1,2} 廖雯¹ 刘璇璇¹¹

(1. 湖北大学区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062;

2. 湖北省农业遥感应用工程技术研究中心, 湖北 武汉 430062)

【摘要】: 汉江流域是南水北调中线工程重要的水源涵养区和生态屏障区, 研究其生态系统产水服务功能的时空变化及影响因素对实现汉江流域高质量持续调水和生态环境保护具有重要意义。基于 GoogleEarthEngine 云平台多源异构数据以及气象、土壤等资料作为输入, 采用 InVEST 模型产水模块和情景分析法估算和阐明了 2001~2019 年汉江流域产水量及其时空变化特征, 并探讨了降水和土地利用变化对汉江流域产水量的影响。结果表明: (1) 2001~2019 年, 汉江流域产水量先增加后减少, 不同时期流域产水深度空间格局基本一致, 呈中北部低、西南部及东南部高的空间分异特征; 全流域产水深度以增加为主, 增加区域集中于丹江口以上流域, 减少区域主要在唐白河流域。(2) 子流域尺度上, 丹江口以上流域对全流域产水量的贡献最高, 是汉江流域主要产水区, 唐白河流域的贡献最低。(3) 城镇与建成区、裸地和草地平均产水深度最大; 稀疏森林、农田和郁闭森林是流域产水的主要贡献地类, 三者提供了汉江流域产水总量的 90%; 平原区产水深度最高, 较低中山区产水深度最低。(4) 2001~2019 年, 降水变化和土地利用变化对产水量变化的贡献率分别为 94% 和 6%, 表明降水变化对产水量的影响更显著, 土地利用变化的影响较小。研究结果可为汉江流域科学合理推进退耕还林(草)工程、水源地生态环境可持续发展提供科学依据。

【关键词】: InVEST 模型 产水量 土地利用变化 汉江流域

【中图分类号】: X171.1; TP79 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)01-0073-10

产水服务是生态系统最重要的服务功能之一^[1], 对改善流域水文状况和调节区域水分循环发挥着关键作用。流域产水服务功能具有较强的时空变异性, 其变化可直接影响气候、水文、植被和土壤状况等, 是反映流域生态系统质量的重要指示器。流域产水服务时空变化及其影响机制研究已成为当前生态学和在水文学交叉领域的热点议题之一^[2,3,4], 对流域水资源优化配置及生态系统可持续发展具有重要的应用价值和指导意义。

传统产水服务评估主要是基于小流域实际观测资料采用土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、水量平衡法、降水储存量法、年径流量法和地下径流增长法等进行估算^[5]。受监测站点数量、观测设备条件等限制, 以上方法在大空间尺度估算时会产生较大误差。随着遥感和 GIS 技术在生态学、水文学领域中的发展应用, 越来越多的模型可实现流域产水服务功能的模拟和评估, 如 MIKESHE 模型、TOPMODEL 模型、SWAT 模型和 InVEST 模型等。其中, 基于生态过程的 InVEST 模型以其在数据输入、参数率定、空间分析及结果可视化等方面的优势, 近些年被广泛用于生态系统服务功能及其价值的评估。InVEST 模型的产水模块基于水量平衡原理, 将降水量减去实际蒸散量的差值作为产水量, 充分考虑了不同土地利用类型土壤渗透性的空间差异以及地形等因素对径流的影响^[6]。此外, InVEST 模型设定的栅格运行环境有助于明确流域产汇流空间异质性的驱动因素, 并有利于评估不同景观单元对流域

作者简介: 胡砚霞(1987~), 女, 讲师, 主要研究方向为生态环境遥感监测、流域水土过程与环境效应。E-mail: yanxiahu@hubu.edu.cn; 于兴修 E-mail: xxy2000@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471227); 湖北省自然科学基金项目(2016CFB201); 区域开发与环境影响湖北省重点实验室开放基金项目(2018(C)002)

产水的相对贡献量。InVEST 模型的产水模块已广泛运用于许多国家和地区,并取得了较好的应用效果。国外学者利用该模块估算了美国加利福尼亚州^[7]、英国^[8]、西班牙 Francolí 流域^[9]、西非加纳和科特迪瓦^[10]、伊朗 Narmab 大坝流域^[11]等地的产水服务功能。国内学者基于该模块研究了三江源区^[12]、东北地区^[13]、北京妫水河流域^[14]、黑河流域^[15]、黄河流域^[16,17]、石羊河流域^[18]、横断山区^[19,20]和秦岭^[21]等地的产水量及其时空变化,并探讨了气候变化与人类活动对产水量的影响。

汉江流域是我国重要的水源涵养区,也是南水北调中线工程的水源地。汉江流域水资源充足和水质安全是保障南水北调中线工程高质量持续调水的关键。自 1999 年以来,国家在汉江流域先后开展了退耕还林(草)、天然林保护和水土保持等一系列生态建设工程,流域生态环境得到明显改善。随着相关工程的推进,汉江流域水域范围扩大、植被覆盖增加,蒸散作用也相应增强,产水量变化对流域生态环境的影响引起广泛关注。此外,近些年汉江流域中下游城镇化发展迅速,耕地灌溉用水增加,流域水资源矛盾日益加剧。因此,开展汉江流域产水量时空变化及其影响因素研究,对明确水源涵养重点生态功能保护区、实现流域水资源可持续发展具有重要的科学意义。已有研究对汉江流域生态建设与环境保护发挥了积极作用,主要集中在典型区域生态建设前后土壤侵蚀演变^[22]、径流变化^[23]、植被覆盖变化^[24]、景观格局演变与环境影响评价^[25]等方面。目前,针对汉江流域生态系统产水服务功能的研究不足,且时间尺度单一,尤其缺乏气候变化与人类活动对汉江流域产水量变化贡献率的定量研究。因此,亟待开展汉江流域产水服务估算及其影响因素研究,明确产水量与降水、土地利用等关键因素的时空动态响应关系,以期为流域水资源综合利用与合理配置、水源地生态文明建设与高质量发展提供科学评估与决策支持。

本研究以谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)云平台提供的多源异构遥感数据作为 InVEST 模型产水服务模拟的数据支撑,有效地将遥感大数据、GIS 技术与生态系统服务评估相融合,数据的精细度和可用性得到增强,有助于高效提取流域生态扰动及恢复特征,进而提高生态系统服务时空动态模拟的精度,在研究方法及思路具有一定的创新性和实用性。首先,利用 InVEST 模型的产水模块对 2001 年(退耕还林初期)、2015 年(南水北调中线工程正式通水后)和 2019 年汉江流域的产水量进行估算,从栅格与子流域两个尺度分析汉江流域产水量的时空变化,并探讨不同土地利用和地形条件下的产水能力差异。其次,采用情景分析法定量区分降水变化和土地利用变化对流域产水量变化的贡献率,进而明确影响汉江流域产水服务变化的关键因素。研究结果可为汉江流域科学合理推进退耕还林(草)工程、水源地生态环境可持续发展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

汉江是长江最大的支流,全长 1577km,发源于陕西省境秦岭南麓,干流流经陕西、湖北两省,于武汉市汉口龙王庙处汇入长江。汉江流域位于 30° 10' N~34° 20' N、106° 15' E~114° 20' E 之间,流域面积 15.9 万 km²。汉江流域地势西高东低,西部为中低山区,东部为丘陵平原。汉江干流丹江口以上为上游,地势起伏较大,南、北分别是大巴山和秦岭山地,中间为汉水谷地;丹江口至钟祥为中游,地势相对平坦,南、北分别为武当山和伏牛山,中间是南阳盆地;钟祥以下为下游,地势平坦,属江汉平原。汉江流域地处亚热带季风气候区,温和湿润,年均降水量 894mm,水量较丰沛,但年内分配不均,主要集中于 5~10 月;径流主要由降水补给,年内分配与降水相对应,6 月下旬至 10 月上旬为汛期^[23]。根据水资源分区,汉江流域分为 3 个三级流域:丹江口以上流域、唐白河流域和丹江口以下干流流域,面积分别占汉江流域的 47%、21%和 32%。汉江上游流域以森林为主,天然植被主要有常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林和混交林等,植被覆盖相对较好,是南水北调中线工程的水源涵养区;中下游流域以农田为主,是土壤侵蚀敏感区^[26,27]。图 1 示意汉江流域地理概况。

1.2 产水模型

InVEST 模型的产水模块基于 Budyko 假设的水热耦合平衡关系计算年尺度上流域产水量^[28],本研究以此估算与分析 2001、2015 和 2019 年汉江流域产水量的空间分布及其时间变化。栅格尺度上, InVEST 模型通过降水量减去实际蒸散量计算每个栅格单元的年均产水深度,该值包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水量以及冠层截留量。计算公式如下:

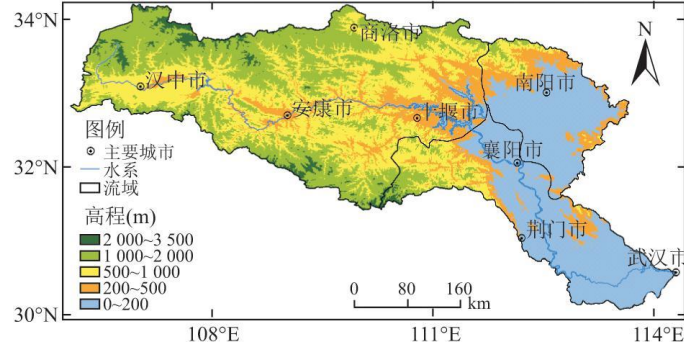


图 1 汉江流域地理概况

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad (1)$$

式中：Y(x)为栅格 x 的年均产水深度；AET(x)是栅格 x 的年均实际蒸散量；P(x)是栅格 x 的年均降水量。AET(x)/P(x)是实际蒸散量与降水量的比值，可依据 Zhang 等^[29]在 Budyko 曲线基础上改进的方法进行计算：

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = \frac{1 + \omega(x) + R(x)}{1 + \omega(x) \cdot R(x) + 1/R(x)} \quad (2)$$

$$\omega(x) = Z \cdot \frac{PAWC(x)}{P(x)} \quad (3)$$

$$R(x) = \frac{k(x) \cdot ET_0}{P(x)} \quad (4)$$

式中：ω(x)为改进的植被年可利用水量与预期降水量的比值；Z 是 Zhang 系数^[29]；PAWC(x)为植物可利用含水量；R(x)是 Budyko 干燥指数，为潜在蒸散发与降水量的比值；k(x)是植物蒸散系数；ET₀为年均参考蒸散量。

1.3 模型输入与参数确定

InVEST 模型的输入变量包括年均降水量、年均参考蒸散量、根系限制层深度、植物可利用含水量(PAWC)、土地利用类型、流域与子流域矢量，其中需要确定的参数有 Zhang 系数、不同植被的最大根系深度和蒸散系数等。

年均降水量来源于 GPM 卫星月降水产品 GPM_3IMERGM(<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)，GPM 数据的空间分辨率在同类型产品中较高(0.1°)，相关研究已表明 GPM 降水产品在中国几大流域(如长江流域、珠江流域、淮河流域等)呈现较高的观测精度^[30]。年均参考蒸散量基于汉江流域 15 个气象站逐日气象资料(<http://data.cma.cn/>)依据联合国粮农组织(FAO)Penman-Monteith 方程进行计算。根系限制层深度与土壤的理化性质有关，常用土壤深度代替，可由土壤属性数据获取。植物可利用含水量(PAWC)可基于土壤质地和土壤有机质含量进行计算^[31]：

$$\begin{aligned}
PAWC = & 54.509 - 0.132 \times SAND - \\
& 0.03 \times (SAND)^2 - 0.55 \times SILT - \\
& 0.006 \times (SILT)^2 - 0.738 \times CLAY + \\
& 0.007 \times (CLAY)^2 - 2.688 \times OM + \\
& 0.501 \times (OM)^2
\end{aligned} \quad (5)$$

式中：SAND、SILT、CLAY 分别表示土壤砂粒、粉粒、粘粒的比例(%)；OM 表示土壤有机碳含量(%)。上述土壤深度以及沙粒、粉粒、粘粒、有机碳含量来源于国家青藏高原科学数据中心提供的 1：100 万中国土壤数据集(v1.2)^[32](<http://data.tpd.cn>)，空间分辨率为 1km。土地利用数据来源于 NASA 提供的 MODIS 土地覆被产品 MCD12Q1(<https://lpdaac.usgs.gov/>)，空间分辨率为 500m，该数据精度可满足本研究模拟与制图需求。依据 FAO-LCCS2 土地利用分类方案，汉江流域主要包括以下 8 种类型：裸地、水体、城镇与建城区、郁闭森林、稀疏森林、农田与森林镶嵌体、草地、农田。流域与子流域矢量来源于国家地球系统科学数据中心提供的长江流域 1：25 万三级流域分级数据集(<http://www.geodata.cn/>)。Zhang 系数是表征降水分布特征的季节常数，其值介于 1~10 之间。经过多次模拟运行，当 Zhang 系数为 2.6 时，所估算的 2001、2015 和 2019 年汉江流域产水量与实测的多年平均径流量最接近，其中实测径流数据来源于长江水文年鉴和相关研究成果^[33]。生物物理参数主要涉及植物蒸散系数与最大根系深度，可依据文献[18, 20]、FAO 作物参考值^[34]以及 InVEST 模型推荐的参数来确定。

上述模型输入数据的存储格式、空间分辨率、投影方式等均不一致，为了节省人力与硬件资源，本研究基于 GoogleEarthEngine 云平台调用降水、土地利用、蒸散、地形等遥感数据，并进行投影转换、裁剪以及相关预处理与计算。

1.4 情景分析法

降水和实际蒸散量是影响 InVEST 模型模拟结果的主要因素，其中蒸散量与土地利用类型密切相关。本研究采用情景分析法并结合差值比较法探究降水变化和土地利用变化对流域产水服务变化的相对贡献程度。研究时段选取 2001、2015 和 2019 年，这 3 个年份降水均较正常(平水年)，不是极端年份(丰水年或枯水年)，可用于表征退耕还林初期、南水北调中线工程正式通水后和近年来汉江流域产水格局的变化。本研究设计了 2 种情景：

(1) 降水变化情景

保持模型土地利用数据输入不变(以 2001 年土地利用为基准)，降水发生变化，数据输入按 2001、2015 和 2019 年降水实际情况，该情景下模拟出的产水量与实际情景下产水量的差值为降水变化对产水量的影响：

(2) 土地利用变化情景

保持模型降水数据输入不变(以 2001 年降水为基准)，土地利用发生变化，数据输入按 2001、2015 和 2019 年土地利用实际情况，该情景下模拟出的产水量与实际情景下产水量的差值为土地利用变化对产水量的影响。

贡献率的量化通过模拟过程中控制降水变化和土地利用变化情景实现，计算公式如下：

$$R_p = \Delta p / (\Delta p + \Delta l) \times 100\% \quad (6)$$

$$R_l = \Delta l / (\Delta p + \Delta l) \times 100\% \quad (7)$$

式中： R_p 为降水变化对产水量变化的贡献率； R_l 为土地利用变化对产水量变化的贡献率； Δp 、 Δl 分别代表降水变化情景下和土地利用变化情景下产水变化量。

2 结果与分析

2.1 汉江流域产水量的时空变化特征

2001~2019 年，汉江流域产水深度介于 7.48~1461mm 之间。2001、2015 和 2019 年汉江流域的平均产水深度分别为 199、383 和 342mm，平均产水量分别为 305、588 和 524 亿 m^3 。其中，2015 年流域产水量最大，2001 年流域产水量最小。与 2001 年相比，2015 年流域平均产水深度增加了 185mm(产水量增加 283 亿 m^3)，2019 年流域平均产水深度增加了 143mm(产水量增加 219 亿 m^3)；与 2015 年相比，2019 年流域平均产水深度减少了 42mm(产水量减少 64 亿 m^3)。

图 2 为实际情景下 2001、2015 和 2019 年汉江流域产水深度空间格局。从空间分布上看，不同时期产水深度空间分异格局差异较小，整体表现出较一致的规律，中北部产水深度低、西南部及东南部产水深度高。2001 年，产水高值区主要集中在丹江口以下干流流域(荆门以南)；2015 年，西南部(安康、汉中以南)、东南部产水深度较 2001 年增加明显；2019 年，东部产水深度减少，西部(安康以西)产水深度进一步增加，西南部和东南部成为产水量高值区。至 2019 年，西南和东南高、中北部低的产水空间分异特征更加明显，该格局与汉江流域降水和土地利用类型的分布密切相关：降水量高、蒸散量低的区域(如城镇与建成区、裸地和草地)产水能力强；降水量低、蒸散量高的区域(如郁闭森林、水体)产水能力弱。

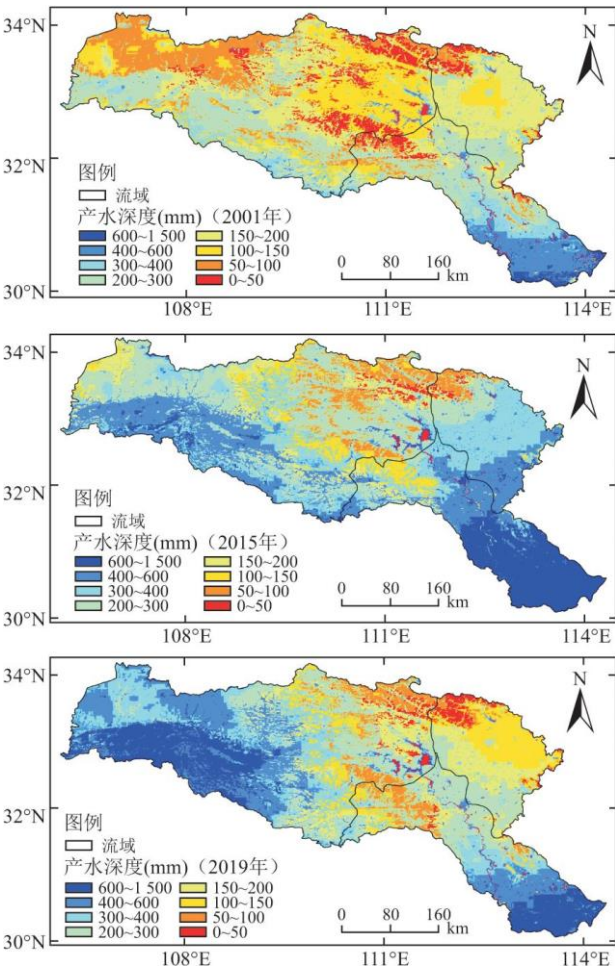


图 2 2001、2015 和 2019 年汉江流域产水深度空间格局

图 3 为实际情景下 2001~2015、2015~2019 和 2001~2019 年汉江流域产水深度变化的空间格局。2001~2015 年，汉江流域大部分区域产水量均呈增加趋势，增加区域约占流域总面积的 93%，其中以丹江口以下干流流域中下游和丹江口以上流域西南部的产水深度增加最为明显。

2015~2019 年，汉江流域产水深度以减少为主，增加区域面积比例 (44%) 小于减少区域面积比例 (56%)。增加区域主要分布于丹江口以上流域的中部、西部，其中西部产水深度持续增加，增加量为全流域最大；丹江口以下干流流域、唐白河流域的产水深度持续减少，尤其是丹江口以下干流流域的中下游，减少量为全流域之最。与前 15 年相反，丹江口以下干流流域的中下游从产水深度增加区域转变为产水深度减少区域。

总体上，2001~2019 年，汉江流域产水深度以增加为主，增加区域约占总面积的 80% 以上，主要集中在丹江口以上流域，部分位于丹江口以下干流流域的下游；减少区域主要集中在唐白河流域，部分位于丹江口以下干流流域的中上游。

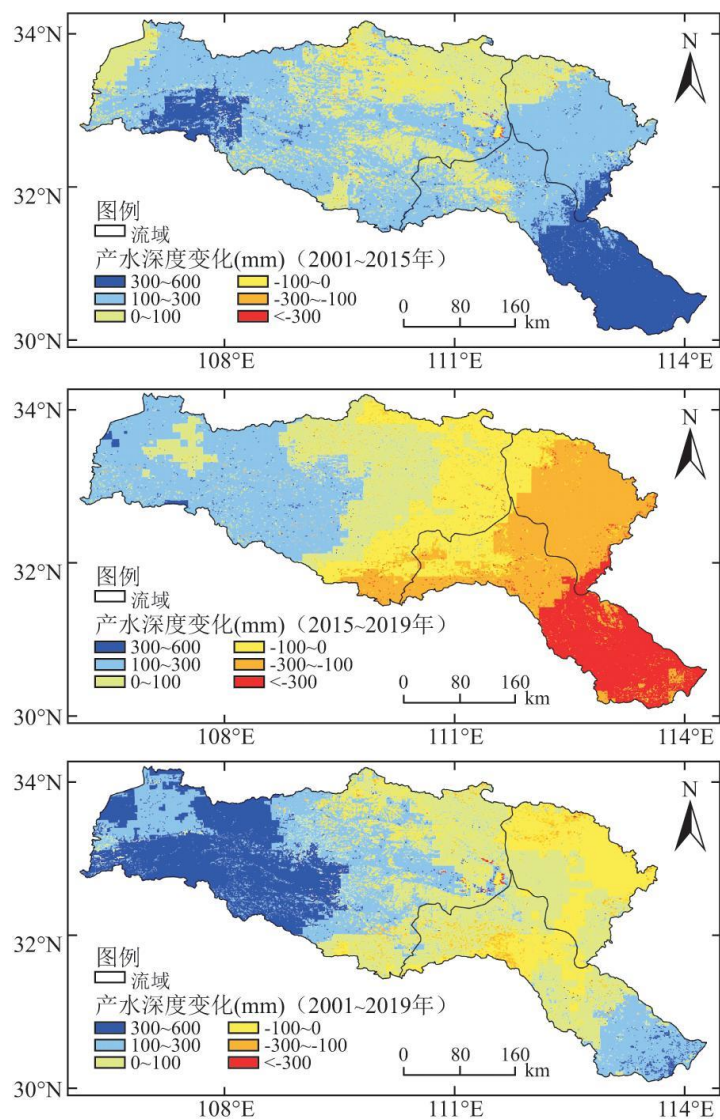


图 3 2001~2015、2015~2019 和 2001~2019 年汉江流域产水深度变化的空间格局

2.2 子流域尺度产水量时空格局

图4为实际情景下2001~2019年汉江流域三级流域产水深度和产水量变化。从子流域尺度看,汉江流域三级流域产水量差异较大,介于40~630亿 m^3 之间。2001~2019年,丹江口以上流域对全流域产水总量贡献最高,平均约占54%,是汉江流域主要产水区;唐白河流域贡献最低,平均约占12%,与该区降水相对较少有关。

2001~2019年,从产水量变化趋势上看,除丹江口以上流域产水量持续增加外(平均增幅为131%),其他两个子流域产水量均是先增加后减少,但也存在一定差异,唐白河流域产水量总体上减少5%,而丹江口以下干流流域产水量总体上增加22%。

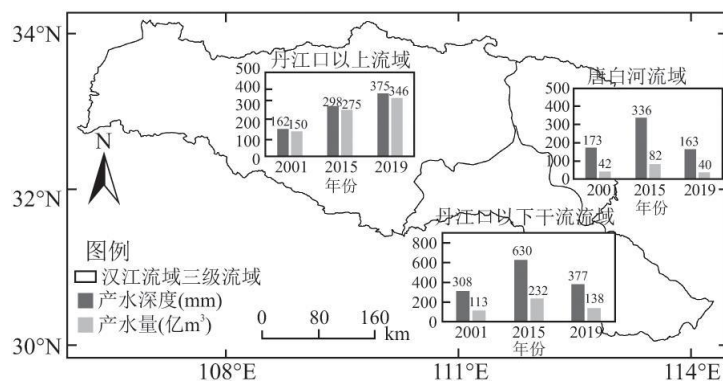


图4 2001~2019年汉江流域三级流域产水深度、产水量变化

2.3 不同土地利用与地形条件下产水深度变化

利用GIS空间分析方法对不同土地利用类型的产水深度进行分类统计,得到2001、2015和2019年汉江流域不同土地利用类型的平均产水深度,结果见图5。多年平均值的统计结果显示,城镇与建成区、裸地和草地的产水能力强,平均产水深度分别为566、587和580mm,这些地类无植被截留降水,蒸散量较其他地类小,因而产水能力相对较高;农田与森林镶嵌体、农田和稀疏森林能透过部分降水,入渗土壤并形成径流,因而平均产水能力大于郁闭森林;水体由于蒸发强,产水能力最低,平均产水深度仅126mm。2001~2019年,汉江流域各土地利用类型的产水深度发生不同幅度的波动,裸地、郁闭森林、稀疏森林平均产水深度持续增加,水体、城镇与建成区、农田与森林镶嵌体、草地、农田先增加后减少。

不同土地利用类型产水总量与各地类面积密切相关。汉江流域土地利用类型以郁闭森林、稀疏森林和农田为主(图8),三者分别占流域面积的33%、37%和23%。2001~2019年,稀疏森林、农田和郁闭森林是流域产水的主要贡献地类,分别占全流域产水总量的40%、29%和21%。2001、2015和2019年,三者共提供了流域产水总量的88.4%、89.6%、90.2%,呈增加趋势。

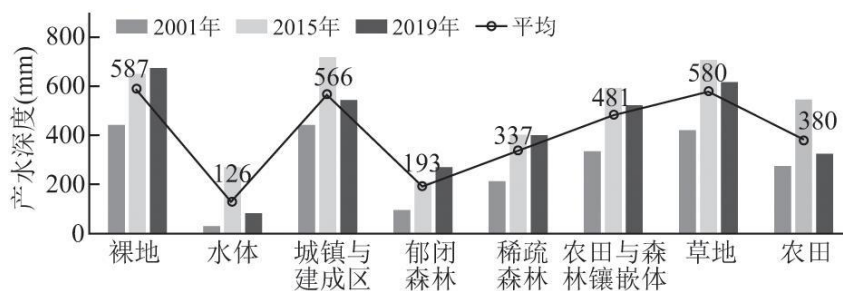


图5 2001~2019年汉江流域不同土地利用类型平均产水深度变化

此外，利用 GIS 空间分析方法对不同海拔高度上产水深度进行分区统计，得到 2001、2015 和 2019 年汉江流域各海拔区间的平均产水深度，结果见图 6。多年平均值的统计结果显示，平原(0~200m)和较高中山(2000~3500m)的平均产水深度较大；低山(500~1000m)平均产水深度大于丘陵(200~500m)；较低中山(1000~2000m)区平均产水深度最低。2001~2019 年，汉江流域各海拔区间的产水深度发生不同程度的变化，除平原外，其他海拔区间(丘陵、低山、较低中山、较高中山)的平均产水深度持续增加。

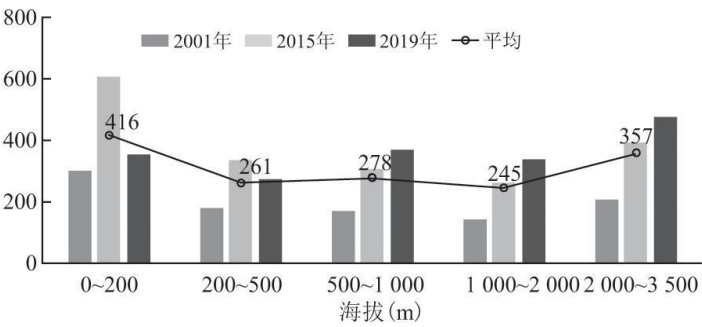


图 6 2001~2019 年汉江流域不同海拔平均产水深度变化

2.4 降水变化、土地利用变化对产水量的相对贡献程度

降水变化情景下，2015、2019 年汉江流域产水深度较基准年(2001 年)分别增加 198 和 159mm, 产水量分别增加 304 和 244 亿 m³(表 1)。不同地类平均产水深度变化明显，除裸地外，其他地类的平均产水量均不同程度增加。其中，水体、郁闭森林平均产水量增幅最大，分别为 878%和 198%。当土地利用不变而降水发生变化时，汉江流域产水格局发生较大变化。

表 1 降水变化和土地利用变化情景下汉江流域产水深度与产水量的变化

	年份	产水深度及变化(mm)	产水量及变化(亿 m ³)
基准	2001	199	305
降水变化情景	2015	397(↑198)	609(↑304)
	2019	358(↑159)	549(↑244)
土地利用变化情景	2015	190(↓9)	291(↓14)
	2019	188(↓11)	289(↓16)

土地利用变化情景下，与基准年(2001 年)相比，2015、2019 年汉江流域产水深度分别减少 9 和 11mm, 产水量分别减少 14 和 16 亿 m³(表 1)。裸地、草地、城镇与建成区、农田的平均产水量增加，其中裸地和草地增幅较大，分别为 21%、16%;农田与森林镶嵌体、郁闭森林、水体的平均产水量减少，减幅分别为 11%、8%和 7%;稀疏森林的平均产水量变化不大。当降水不变而土地利用发生变化时，汉江流域产水空间格局和变化均不大。

总体上，2001~2015 年，降水变化和土地利用变化对产水变化的贡献率分别为 96%和 4%;2001~2019 年，二者的贡献率分别为 94%和 6%(表 2)。

表 2 汉江流域及其子流域降水变化和土地利用变化对产水量变化的贡献率(%)

	2001~2015 年		2001~2019 年	
	降水变化	土地利用变化	降水变化	土地利用变化
全流域	96	4	94	6
丹江口以上流域	92	8	94	6
唐白河流域	98	2	62	38
丹江口以下干流流域	99	1	99	1

以上结果均表明，降水变化对产水量的影响更显著，土地利用变化的影响较小。据图 7 和图 8, 2001~2019 年，汉江流域降水量年内、年际波动较大，部分地类面积发生了较大变化，但土地利用格局整体稳定。本文研究年段的选取也充分考虑了降水因素，尽量选择平水年，避开丰水年和枯水年，并兼顾流域生态建设工程和调水工程的推进时间。值得注意的是，2001~2015 年，丹江口以上流域土地利用变化对产水量变化的贡献率相对较大，达 8%;2001~2019 年，唐白河流域土地利用变化对产水量变化的贡献率相对较大，达 38%, 该结果与汉江流域退耕还林(草)工程的推进时间密切相关。

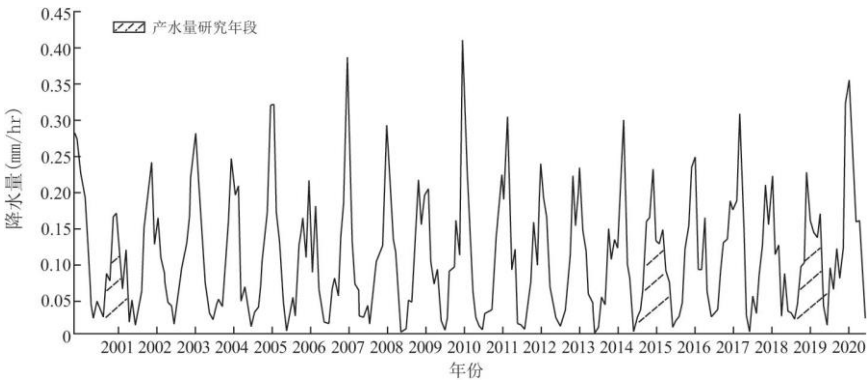


图 7 2001~2020 年汉江流域月降水量变化

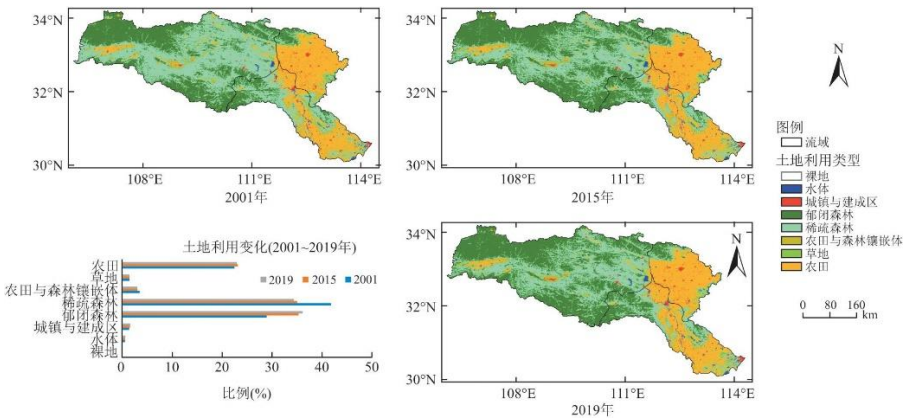


图 8 2001、2015 和 2019 年汉江流域土地利用变化

3 结论与讨论

本研究基于 Google Earth Engine 云平台多源异构遥感数据以及气象、土壤资料,利用 InVEST 模型产水模块估算与分析汉江流域 2001~2019 年产水量及其时空变化特征,并采用情景分析法定量解析降水和土地利用变化对汉江流域产水量变化的贡献率,得出以下结论:

(1)2001、2015 和 2019 年,汉江流域年均产水量分别为 305、588 和 524 亿 m^3 ;不同时期流域产水空间格局基本一致,呈现出中北部低、西南部及东南部高的空间分异特征;2001~2019 年,全流域产水深度以增加为主,增加区域主要集中在丹江口以上流域,减少区域主要分布于唐白河流域。

(2)子流域尺度上,丹江口以上流域、唐白河流域、丹江口以下干流流域分别占汉江流域产水总量的 54%、12%和 34%;2001~2019 年,丹江口以上流域产水量持续增加,唐白河流域、丹江口以下干流流域产水量先增加后减少。

(3)汉江流域产水能力最强的地类为城镇与建成区、裸地和草地,平均产水深度分别为 566、587 和 580mm,产水能力最弱的是水体,平均产水深度为 126mm;稀疏森林、农田和郁闭森林是流域产水的主要贡献地类,分别占汉江流域产水总量的 40%、29%和 21%;平原区产水深度最高,较低中山区产水深度最低;2001~2019 年,除平原外,其他海拔区间平均产水深度均持续增加。

(4)2001~2019 年,降水变化和土地利用变化对汉江流域产水量变化的贡献率分别为 94%和 6%,表明降水变化对产水量的影响更显著,土地利用变化的影响较小。

本研究以年为尺度估算汉江流域的产水量,忽略了流域产水的年内和年际变化,且在子流域选取上,仅涉及汉江流域三级流域,一定程度上掩盖了土地利用变化空间差异对产水量的影响。土地利用类型之间的相互转移可能导致产水量的增加或减少,如建设用地增加通常会增加产水量、郁闭森林增加一般会减少产水量,两方面抵消会使土地利用变化对产水量影响不显著。今后应进一步开展不同时空尺度上流域产水空间分异及其归因方面的研究。此外,InVEST 模型产水模块输入的数据和参数来源广泛,如根系限制层深度、植物可利用含水量、植物蒸散系数和 Zhang 系数等来自中国土壤数据集、相关文献、FAO 推荐的参数以及多次模拟试验等,缺乏统一的标准和适用性评价,尽管对判断流域产水格局影响不大,但仍存在一定程度的不确定性,模型模拟精度还需结合大量实际观测进行验证。

参考文献:

- [1]COSTANZA R,D' ARGE R,DE GROOT R,et al.The value of the world' s ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387:253-260.
- [2]傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576.
- [3]李文华,张彪,谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2009,24(1):1-10.
- [4]戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J].地球科学进展,2015,30(11):1250-1259.
- [5]张彪,李文华,谢高地,等.森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J].生态学杂志,2009,28(3):529-534.
- [6]SHARP R,DOUGLASS J,WOLNY S,et al.InVEST 3.9.0.post175+ug.gc53f85c User' s Guide [OL].The Natural Capital Project,Stanford University,University of Minnesota,The Nature Conservancy,and World Wildlife Fund,2020.

-
- [7]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.
- [8]REDHEAD J W,STRATFORD C,SHARPS K,et al.Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale [J].Science of the Total Environment,2016,569:1418-1426.
- [9]MARQUÈS 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,2013,263:224-232.
- [10]LEH M D K,MATLOCK M D,Cummings E C,et al.Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J].Agriculture,Ecosystems & Environment,2013,165:6-18.
- [11]DANESHI A,BROUWER R,NAJAFINEJAD A,et al.Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST [J].Journal of Hydrology,2021,593:125621.
- [12]潘韬,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服务时空变化.应用生态学报,2013,24(1):183-189.
- [13]吴健,李英花,黄利亚,等.东北地区产水量时空分布格局及其驱动因素[J].生态学杂志,2017,36(11):3216-3223.
- [14]GAO J,LI F,GAO H,et al.The impact of land-use change on water-related ecosystem services:A study of the Guishui River Basin,Beijing,China [J].Journal of Cleaner Production,2017,163:S148-S155.
- [15]张福平,李肖娟,冯起,等.基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量[J].中国沙漠,2018,38(6):1321-1329.
- [16]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.
- [17]杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(8):2731-2739.
- [18]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.
- [19]戴尔阜,王亚慧.横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J].地理学报,2020,75(3):607-619.
- [20]王亚慧,戴尔阜,马良,等.横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究[J].自然资源学报,2020,35(2):371-386.
- [21]宁亚洲,张福平,冯起,等.秦岭水源涵养功能时空变化及其影响因素[J].生态学杂志,2020,39(9):3080-3091.
- [22]朱捷缘,卢慧婷,郑天晨,等.南水北调中线工程水源区水土保持治理成效[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):310-320.

-
- [23]王栋, 吴栋栋, 解效白, 等. 汉江流域汛期径流时空变化特征研究[J]. 人民珠江, 2020, 41(4):30-39.
- [24]卜红梅, 党海山, 张全发. 汉江上游金水河流域森林植被对水环境的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(5):1341-1348.
- [25]胡安焱, 郭生练, 郭靖, 等. 丹江口水库对汉江流域中下游水文生态的影响[C]//第五届中国水论坛论文集. 中国水利水电出版社, 2007:881-885.
- [26]高艳丽, 李红波, 侯蕊. 汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7):1619-1630.
- [27]蔡述明, 陈国阶, 杜耘, 等. 汉江流域可持续发展的思考[J]. 长江流域资源与环境, 2000, 9(4):411-418.
- [28]BUDYKO M I. Climate and life [M]. New York:Academic press, 1974.
- [29]ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resources Research, 2001, 37(3):701-708.
- [30]李麒麟, 张万昌, 易路, 等. GPM 与 TRMM 降水数据在中国大陆的精度评估与对比[J]. 水科学进展, 2018, 29(3):303-313.
- [31]ZHOU W, LIU G, PAN J, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1):3-12.
- [32]孟现勇, 王浩. 基于世界土壤数据库 (HWSD) 土壤数据集 (v1.2) [DB]. 国家青藏高原科学数据中心, 2018.
- [33]田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(11):2307-2318.
- [34]DROOGERS P, ALLEN R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1):33-45.