

# 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究

王亚慧<sup>1,2</sup>, 戴尔阜<sup>1,2</sup>, 马良<sup>1,2</sup>, 尹乐<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室拉萨高原生态系统研究站, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 运用InVEST模型产水模块开展横断山区1990-2015年产水的量化评估, 并开展相应的时空特征及影响因素分析。结果表明: (1) 空间分布上, 横断山区产水量均表现为南高北低的空间格局, 垂直方向上, 产水能力随着海拔的增加呈减小趋势。(2) 1990-2015年产水深度表现为先小幅增大后明显减小再小幅增大的波动变化趋势。(3) 不同土地利用类型的平均产水能力差异较大。其中以建设用地产水能力最强, 约为550~920 mm; 林地、草地居中, 分别为438~650 mm和412~580 mm; 未利用地和水域产水能力最弱, 分别为273~457 mm和56~237 mm。(4) 产水量空间分布与海拔及草地比例呈现显著的负相关, 与降水量及林地比例呈显著正相关; 时间变化上产水量与降水量呈显著正相关关系。该研究有助于推进山区生态系统服务研究的发展, 其结果可为横断山区流域水资源管理、维持区域可持续发展提供科学支撑。

**关键词:** 生态系统服务; 产水量; InVEST模型; 横断山区; 时空格局

生态系统服务是人类从生态系统当中能够获取的包括有形产品以及无形服务在内的所有惠益<sup>[1-3]</sup>, 是生态系统与人类发展的重要联系<sup>[4]</sup>, 目前已经成为生态学以及相关学科的研究热点与前沿问题, 得到了普遍的认识<sup>[5,6]</sup>。产水服务是对社会最具有价值的服务之一<sup>[7]</sup>, 不仅能够满足人类对灌溉、生活生产用水的需求, 而且具有一定的娱乐、美学价值<sup>[8]</sup>。同时产水服务也是影响生物量、碳循环以及泥沙输移等其他生态功能不可或缺的部分<sup>[7]</sup>。因此, 深入了解产水量的时空变化特征、揭示其变化的控制因素具有重要的意义。

产水量研究大多基于土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、水量平衡法、降水储存量等方法, 利用实测数据开展评估和计算<sup>[9,10]</sup>。随着产水服务评估“精细化”“量化”“模型化”“空间化”要求的提出<sup>[11]</sup>, 各类水文模型得到了大力的发展和广泛应用。其中基于生态过程模拟的生态系统服务与权衡交易的综合评估模型(The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tools, InVEST)中的产水模块通过水量平衡原理能够定量空间化区域产水量, 该模块中以降水量除去植被等用于蒸散的水量的差值作为产水量<sup>[12]</sup>。鉴于其在量化单项及综合生态系统服务方面的快速、便捷以及可视化等优点, InVEST模型的产水模块已成功地应用于不同尺度研究区<sup>[8,13-16]</sup>, 其中多数研究关注于产水量的时空分布特征, 也有少数研究以产水量对于不同因子的敏感性为主要研究内容<sup>[8]</sup>, 这

收稿日期: 2018-12-18; 修订日期: 2019-06-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB452702); 国家自然科学基金项目(41571098, 41530749); 国家重点研发计划(2017YFC1502903); 中国科学院科技战略咨询研究院重大咨询项目(Y02015003)

作者简介: 王亚慧(1990-), 女, 山西长治人, 博士, 主要从事土地利用及生态过程研究。

E-mail: wangyah.15b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 戴尔阜(1972-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 研究员, 主要从事土地利用与气候变化对生态系统的影响研究。E-mail: daief@igsrr.ac.cn

些研究能够为生态系统管理者及决策者提供相应的科学参考。近几十年来,气候变化和人类活动的综合影响导致了河流水文状况的全球性变化<sup>[17,18]</sup>。气候、土地利用以及地形是影响产水服务的三大因素<sup>[19]</sup>,他们之间存在着复杂的非线性响应关系。气候变化在一定程度上影响着全球水循环模式<sup>[20]</sup>,进而对产水量产生影响。作为人类活动的直观反映,土地利用变化则可以通过改变水分的蒸发、入渗、植物保水、河流及地下水中的可用水量来影响区域水文循环过程<sup>[21]</sup>,进而影响产水服务的供给能力。当前已经有越来越多的工作致力于包括产水服务在内的生态系统服务影响因素识别研究<sup>[7,11,22]</sup>,但是并未形成一套完整的研究思路。

依据《中国主体功能区划方案》<sup>[23]</sup>,横断山区主体被划分为我国重要的生态功能区。它也是我国及亚洲东南部主要河流的上游地区<sup>[24]</sup>,其产水服务不仅惠及山区居民,同时也是河流下游的国内外居民福祉的重要保证<sup>[25]</sup>。但同时,横断山区也是一个生态脆弱区,生态极易遭受破坏<sup>[26]</sup>。从经济发展上来看,横断山区还是一个相对贫困地区,经济亟待发展。随着山区“新型城镇化”<sup>[27]</sup>的推进以及“乡村振兴”<sup>[28]</sup>战略的实施,山区土地利用势必发生剧烈变化,进而将通过影响水文循环对产水量产生影响。而气候变化则在一定程度上增加了山区水文循环及产水服务变化的不确定性和响应的复杂程度,因此急需对山区产水服务的时空分异变化及原因进行研究。目前已经开展了横断山区部分流域及区域的产水服务评估工作<sup>[15,29,30]</sup>,但缺乏对整个横断山区的研究。本研究中,以横断山区为研究区,借助InVEST模型中的产水模块量化山区产水服务,并从栅格及子流域两个尺度剖析其时空变化特征,同时通过相关分析探究其时空分异的原因,以期推进山区生态系统服务研究的发展,并对流域水资源综合利用及合理配置提供科学支撑。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

横断山区位于我国西南部,由于该地区山脉呈南北向排列而阻断了东西向的交通,“横断”之名由此而来。横断山区具体的空间范围依据不同的研究内容和研究目的而异,参照杨勤业等<sup>[31]</sup>的研究,确定了其具体的空间范围。横断山区主要包括四川省西部、云南省东北部以及西藏自治区东部,位于 $24^{\circ}39' \sim 33^{\circ}34'N$ 、 $96^{\circ}58' \sim 104^{\circ}27'E$ 之间(图1),下属共99个县级行政单位,总面积约为44.97万 $km^2$ 。

全区地势由西北向东南倾斜,除南部与云南高原接壤地区以及东部与四川盆地交接地区海拔在3000 m以下外,其他地区海拔均在3000~4000 m以上。受到西南季风和高原季风的共同影响,该区具有明显的季风气候,干湿季分明;11月至次年4月为湿季,降水量约占全年总降水量的80%~95%,降水分布呈东南和西南多中部少,南多北少的趋势。该区是我国及东南亚主要河流的上游地区,是我国地表径流较为丰富的地区之一。土壤类型涵盖了红壤、棕壤、褐土以及高山土壤等四大土壤系列,植被主要包括阔叶林、针叶林、灌丛、稀树灌草丛、高山稀疏植丛、草甸、沼泽和水生植被。土地利用方面,该区以林地、草地等自然植被为主,两者约占研究区总面积的87.5%,耕地次之,占比7.7%(图1)。

### 1.2 数据来源与处理

本研究采用的数据包括土地利用数据、气象要素数据、土壤数据、1 km DEM数据以及水文观测数据等。土地利用数据来源于对研究区遥感影像的解译,按照Liu等<sup>[32]</sup>提出

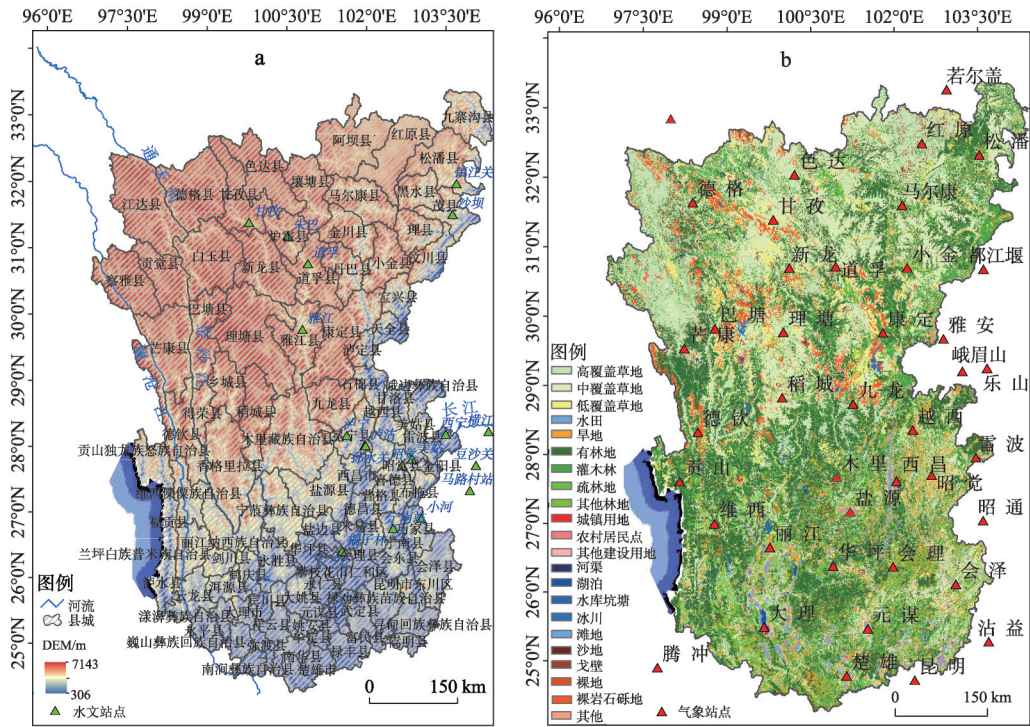


图1 横断山区区位以及土地利用

Fig. 1 Location and current land use of Hengduan Mountain region

的土地利用分类体系，将土地利用分为6大类22个小类（图1）。通过查阅年鉴、统计数据以及定点对比的方式进行验证，结果显示1990年、2000年、2010年及2015年横断山区土地利用数据精度分别为90.02%、86.71%、91.04%和90.21%，该数据能够满足本研究的需求。气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网（<http://data.cma.cn/>），主要包括研究区内及周围42个气象站点（图1）的降水量、辐射、风速、日照等要素的日值和月值数据。考虑到气象数据的年际变化差异较大，以4个时段（1989-1991年、1999-2001年、2009-2011年以及2014-2015年）的滑动平均值分别作为1990年、2000年、2010年和2015年的气象数据值，并通过Anusplin插值方法得到空间分辨率为1 km的栅格数据。土壤数据（包括土壤类型分布、土壤质地、土壤厚度以及土壤有机质含量）和DEM高程数据（1 km）来源于资源环境数据云平台（<http://www.resdc.cn/>）。水文观测数据来自于水文统计年鉴的位于横断山区内的18个水文站点（图1）2006-2015年年径流量数据。

### 1.3 研究方法

#### (1) 研究框架

本文形成了“评估—分异—影响—对策”的研究框架（图2）：① 基于研究区气象数据、土地利用数据、土壤数据以及植被等数据，结合InVEST模型的产水模块开展横断山区1990年、2000年、2010年以及2015年的产水量评估，并通过水文站点多年径流数据进行验证；② 在此基础上分别从产水量的空间分布、时间变化特征、不同土地利用类型产水量对比以及子流域尺度产水量空间化四个方面明确横断山区产水的时空变化分异特征；③ 通过分析产水量与地形、气候、土地利用因子之间的相关关系确定产水量时空变



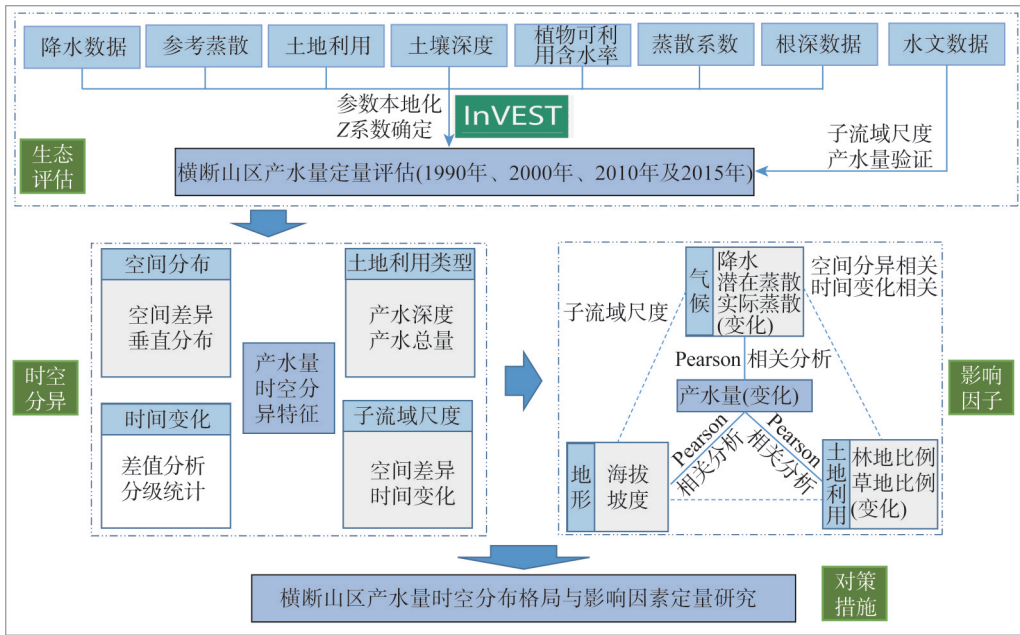


图2 横断山区产水量时空分布及影响因素研究框架

Fig. 2 Framework for spatiotemporal distribution and its influencing factors of water yield in Hengduan Mountain region

异的主要影响因素；④ 针对产水的时空分布特征提出相应的对策及措施。

(2) 产水量评估

本研究采用InVEST模型3.2.0<sup>[12]</sup>版本中的“Water Yield”子模块模拟流域产水空间分布。该模块以流域水量平衡原理为基础，认为在流域上的降水主要通过三种方式散失或者保留在地表：径流量、蒸散量以及流域的蓄水变化量。一般认为在多年尺度上，一个自然闭合流域的蓄水变化量为0。因此，流域的径流量可以表示为降水量与蒸散量的差值。“Water Yield”模块基于上述原理在栅格尺度上通过降水量减去蒸散量计算得到栅格水平的产水量值，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。模型的主要算法如下：

$$Y_{sj} = \left(1 - \frac{AET_{sj}}{P_x}\right) \times P_x \tag{1}$$

式中： $Y_{sj}$  为土地覆被类型j上栅格单元x的年均平均产水量； $AET_{sj}$  是土地覆被类型j在栅格x上的年实际蒸散量； $P_x$  是栅格x上的年降水量。其中  $AET_{sj}/P_x$ （实际蒸散量与降水量比值）是依据Zhang等<sup>[33]</sup>在Budyko曲线基础上发展而来，其表达式如下：

$$\frac{AET_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x + R_{sj}}{1 + \omega_x R_{sj} + (1/R_{sj})} \tag{2}$$

$$\omega_x = Z \frac{PAWC_x}{P_x} \tag{3}$$

$$R_{sj} = \frac{k_{ij} \times ET_0}{p_x} \tag{4}$$

式中： $R_{sj}$  为土地覆被类型j上栅格单元x的Budyko干燥指数，定义为潜在蒸散发与降水



量的比值;  $\omega_x$  为修正植被年可利用水量与预期降水量的比值;  $Z$  为 Zhang 系数<sup>[33]</sup>;  $k_y$  是植物蒸散系数, 是不同发育期中作物蒸散量与参考蒸散量 ( $ET_0$ ) 的比值;  $PAWC_x$  是植物可利用含水量。

InVEST 模型输入的数据包括根系限制层深度数据、不同植被的根深和蒸散系数数据、降雨量数据、植物可利用含水率数据、年均植物参考蒸散量数据、土地利用数据、流域及子流域数据<sup>[11]</sup>。其中根系限制层深度数据来源于土壤数据中的土壤深度。参考蒸散量数据采用联合国粮农组织 (FAO) 改进的 Penman-Monteith 模型计算得到<sup>[34]</sup>。子流域矢量数据则在 Arc Hydro 支持下, 通过对 DEM 数据填洼、计算流向、汇流量、定义河道等步骤得到 (图 9)。植物可利用含水率  $PAWC$  可以通过土壤质地以及土壤有机质含量计算得到<sup>[35]</sup>:

$$PAWC = 54.509 - 0.132sand\% - 0.003(sand\%)^2 - 0.055silt\% - 0.006(silt\%)^2 - 0.738clay\% + 0.007(clay\%)^2 - 2.688OM\% + 0.501(OM\%)^2 \quad (5)$$

式中:  $sand\%$ 、 $silt\%$  和  $clay\%$  分别表示土壤砂粒、粉粒、粘粒的比例;  $OM$  则表示土壤有机质含量。

## 2 结果分析

### 2.1 横断山区产水量的空间分布格局

重建以横断山区 18 个水文站点为出水口的小流域, 并对比各小流域 InVEST 模型模拟的 2010 年产水量与水文年鉴 2006-2015 年年径流量数据。结果显示模拟结果在实际径流量变化范围内 (图 3)。同时对两者进行的相关性分析也表明两者具有较高的相关性, 相关系数高达 0.9947, 说明该模拟值具有很高的可信度。

横断山区产水量在 1990-2015 年间空间分布格局相似 (图 4), 主要表现为南高北低。以 2015 年为例, 产水量高值主要集中于横断山区西部三江并流区以及研究区东部的西川盆地西南缘的越西县、喜德县、美姑县、昭觉县一带; 包括汶川、宝兴、天泉、泸

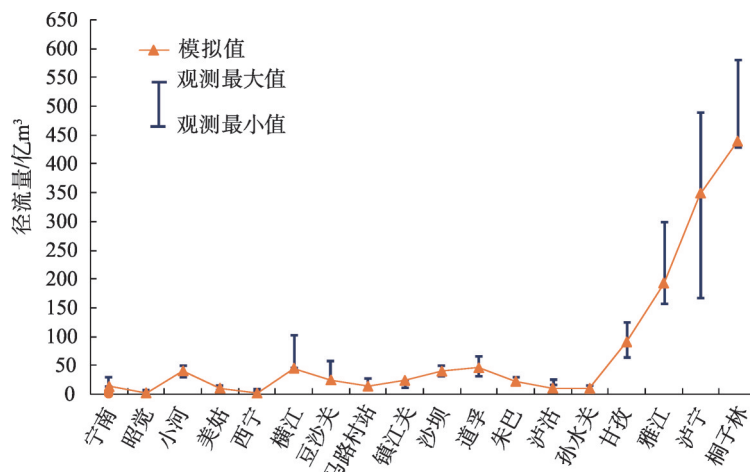


图3 横断山区产水量模拟值与观测值

Fig. 3 Comparison of simulated and observed values of water yield in Hengduan Mountain region

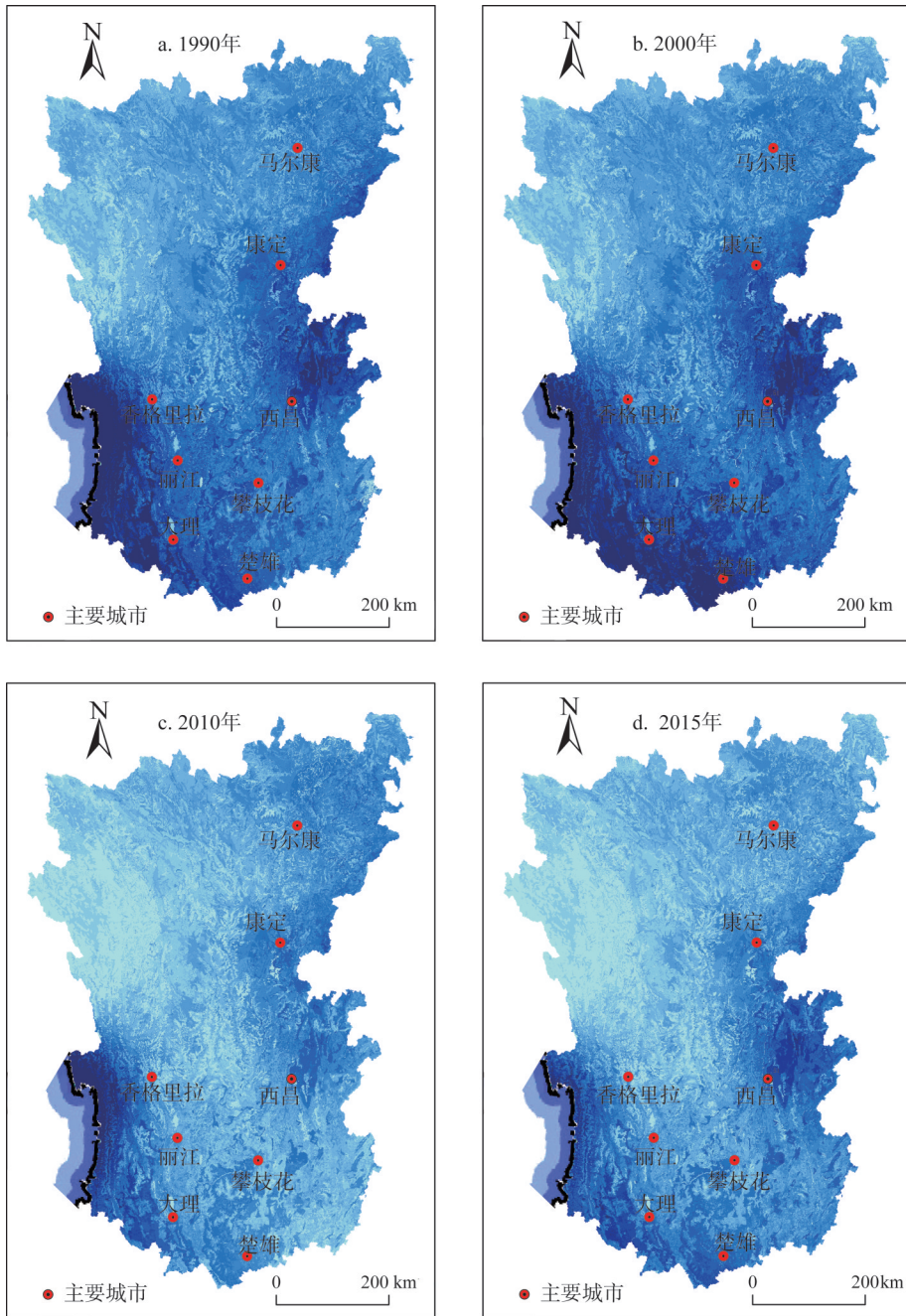


图4 1990-2015年横断山区产水量空间分布格局

Fig. 4 Spatial pattern of water yield in Hengduan Mountain region during 1990-2015

定、石棉、冕宁等县在内的四川盆地周围区域以及山区南部攀枝花至楚雄一带表现为产水量的次高值区。而区域产水量低值则主要集中于研究区西北部的察雅县、贡觉县、芒康县以及巴塘县；次低值区为其外围的普格至得荣县一带。

在垂直方向，按照100 m间隔对产水深度进行平均值统计用以表示横断山区产水能力在垂直梯度上的变化，结果表明，随着海拔的增加，产水能力整体上呈现降低的趋势

(图5)。产水深度在海拔1000 m以下区域保持高水平;之后随着海拔的继续增加,林地、草地面积比例逐渐扩大,耕地比例逐渐减小,平均蒸散量显著增加,进而导致产水深度减少,其中3600 m以下区域林地比例增长较快,而在3600 m以上区域草地面积增长较快,两者在不同高度上共同控制着产水量的变化;至5200 m海拔高度,未利用地比例最高,产水深度达到低值;之后,随着草地比例的逐渐增加,平均产水深度也呈波动升高趋势。

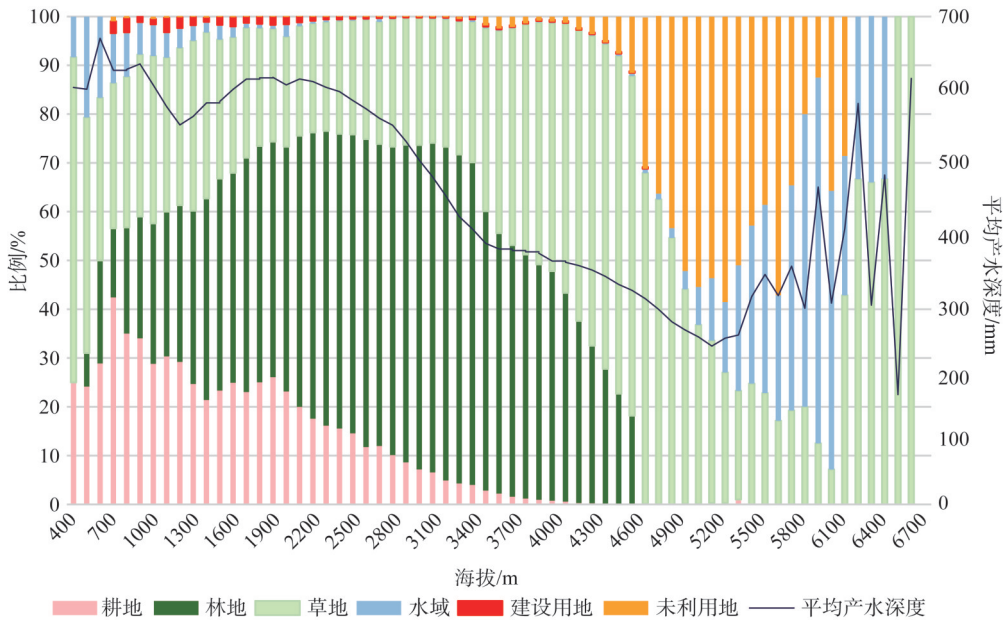


图5 土地利用及产水量的垂直梯度变化

Fig. 5 Vertical gradient change of land use and water yield

## 2.2 横断山区产水量的时间变化特征

1990-2015年横断山区全区平均产水深度变化范围为420~620 mm,产水总量为 $1.9 \times 10^9 \sim 2.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。近25年间,横断山区平均产水量变化趋势较为明显,表现为先增大后减小,再增大的波动变化(图6)。1990-2000年,产水深度小幅增大,上升幅度为4.2%;2000-2010年,产水深度明显减小,减小幅度约为31.9%;2010年之后,产水深度又小幅增加,增加量为14 mm。总体来看,产水量呈现出衰退趋势:1990年和2000年产水量处于高水平状态,产水深度处于600 mm左右;2010年和2015年,产水量处于低水平状态,平均产水深度约为430 mm。

从空间格局时间变化来看(图7),1990-2000年横断山区平均产水深度以增加为主,增加面积约占研究区总面积的67.3%,但增加幅度较小,增长率小于10%的区域约占产水

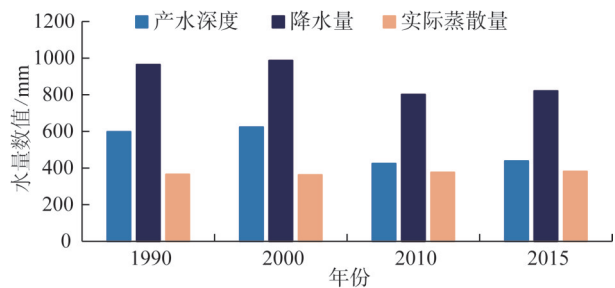


图6 1990-2015年横断山区平均产水深度、降水量及实际蒸散量

Fig. 6 Variation of annual average water yield, precipitation and evapotranspiration during 1990-2015 in Hengduan Mountain region



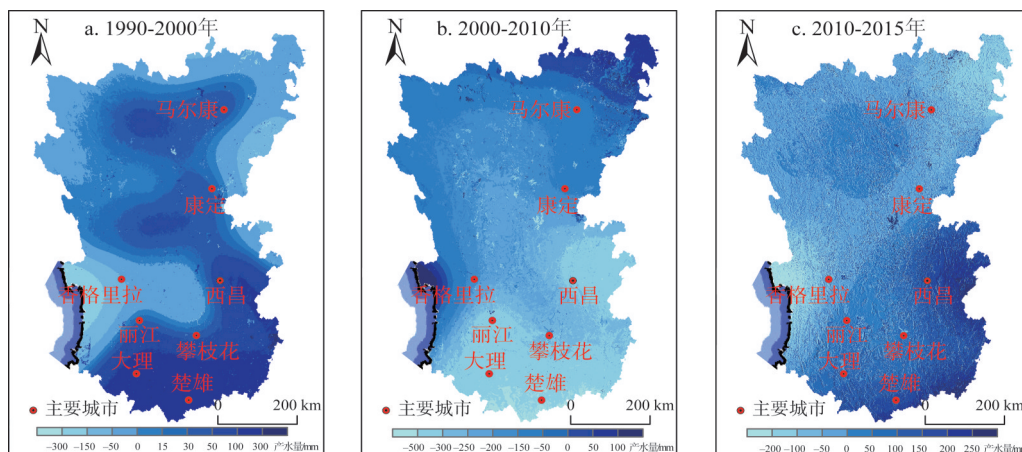


图7 1990-2015年横断山区产水年际变化空间分布格局

Fig. 7 Spatiotemporal distribution of the water yield variation in Hengduan Mountain region

深度增长区域的64.6% (图7a)。空间分布上,产水量减小区域主要分布于研究区边缘地带;增加区域按照增加幅度表现为条带状递变,其中南部地区增加幅度超过100 mm,是全区增加最大的地区。2000-2010年,产水量明显的减小。约92.4%的区域产水量呈现减小趋势,其中67.6%的区域减小率高于30% (图7b)。产水量增加地区仅分布于研究区东北角以及横断山区西部的贡山独龙族怒族自治县,产水量减小幅度则表现为由山区南部向北部的递减。2010-2015年,产水量增加与减小的区域面积相当(分别为48.6%和51.4%) (图7c)。石棉县—云龙县—一线以西,除炉霍县、新龙县、道孚县、甘孜县南部以及雅江县和理塘县北部区域外,产水深度整体表现为不同程度的减小;在该线以东区域则主要表现为产水量的增加,其增加幅度由西北向东南递增。

### 2.3 不同土地利用类型产水量

受单位面积平均产水能力以及分布面积的双重影响,产水总量在不同土地利用类型之间存在较大差异。林地、草地是横断山区的主要土地利用类型,分别占研究区总面积的44.9%和42.5%,同时两者又具有较高的单位面积产水量,因此林地和草地是横断山区产水总量的主要贡献者,提供了整个山区总产水量的86.7%。耕地提供了全区10.2%的产水总量,建设用地和未利用地产水总量分别为0.6%和2.4%。

与山区整体产水量变化相似,除未利用地之外,其余土地利用类型的平均产水深度在1990-2015年间也表现为2000-2010年的大幅减小,在1990-2000年以及2010-2015年间表现为小幅增加的趋势(图8)。1990年及2000年各土地利用类型的产水量处于高水平状态,2010年及2015年为低水平状态。由于不同土地利用类型的蒸散能力、土壤含水量、枯落物持水量以及冠层截留量均存在差异,因此不同土地利用类型存在明显的产水能力差异<sup>[36-38]</sup>。其中以建设用地的产水能力最强,2010年其产水深度高达920 mm;水域产水能力最弱;林地、草地居中,分别为650 mm和580 mm。产水量总体上与植被蒸散量呈反比关系,一般建设用地植被最少<sup>[38]</sup>,其蒸散量也最小,因此具有较高的产水量,但需要注意的是该区域所产生水流最终进入城市排水管道,难以被人利用;林地、草地蒸散能力居中且相差不大;而水体的蒸散发能力最强,明显高于植被蒸散量,因此水域的产

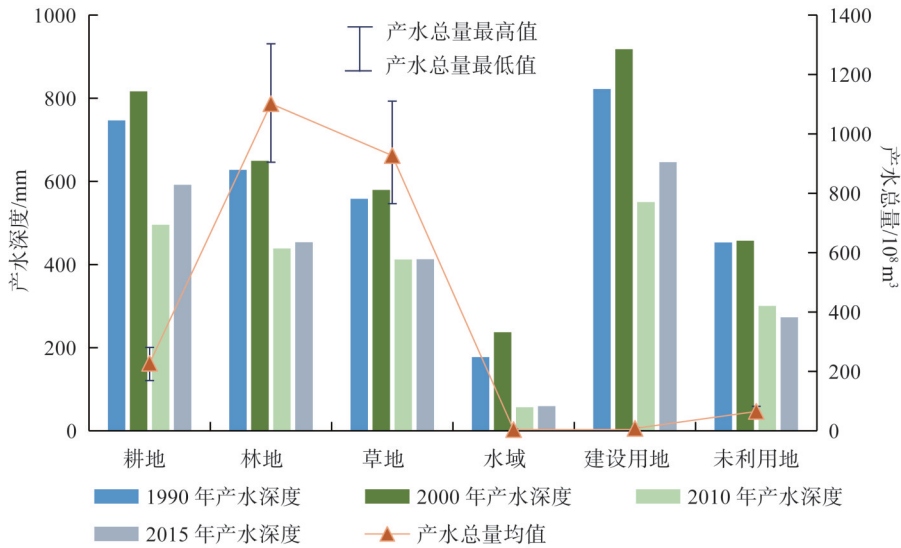


图8 2015年横断山区不同土地利用类型平均产水深度时间变化及当前产水总量  
Fig. 8 Variation of average water yield and current total water yield of different land use types in Hengduan Mountain region

水量最低, 在空间分布上形成明显的低值区(图8)。耕地的蒸散能力由于农作物种类的差异变化较大。在横断山区, 耕地的产水量较高, 主要是由于其主要集中于山区的降水量高值区附近, 产水量受降水量的影响较大。

#### 2.4 子流域尺度产水量时空格局

流域是产水量形成以及水资源管理的基本单元。尽管在栅格尺度上产水量的表达能够更细致地表现其空间差异性, 但在水资源政策实施以及水资源管理方面缺乏科学支撑。本研究在前述研究的基础上开展了横断山区子流域尺度的平均产水深度时空变化格局分析。1990-2015年横断山区子流域平均产水深度大致在80~1200 mm(图9)。近20年间子流域产水量格局基本一致, 均表现为由西北向东南方向的增加, 山区南部子流域明显高于北部子流域, 这与降水量以及实际蒸散量空间分异有关, 各年子流域尺度降水量由西北向东南逐级增加。

时间变化上, 1990年和2000年子流域产水深度整体上高于2010年和2015年(图9)。具体地, 1990年58号子流域产水深度小于300 mm, 是全区产水能力最弱的子流域, 40号和59号流域产水深度超过1000 mm, 是产水能力最强的子流域。1990-2000年, 除东北部1、2、17、43号流域外, 山区大部分子流域产水功能均有不同程度的提高, 但增加幅度较小, 约34%的子流域增长幅度小于10%, 8%的子流域产水增长幅度介于10%和20%之间, 增长幅度大于20%的子流域占比也约为8%, 但其面积积极有限, 不足研究区的7%。2000-2010年, 产水量增加的子流域仅7个, 大部分子流域产水量具有明显的下降趋势, 其中下降幅度超过20%的子流域约为36个, 超35%的子流域约为30个。2010-2015年, 产水深度具有小幅的增加, 其中子流域产水下下降幅度集中于10%以下, 而增加幅度超过10%的子流域约为18个, 面积约占研究区总面积的35%。

#### 2.5 产水时空变化的驱动因素分析

为了明确横断山区子流域尺度上产水量空间分布格局及时间变化的驱动因素, 选择

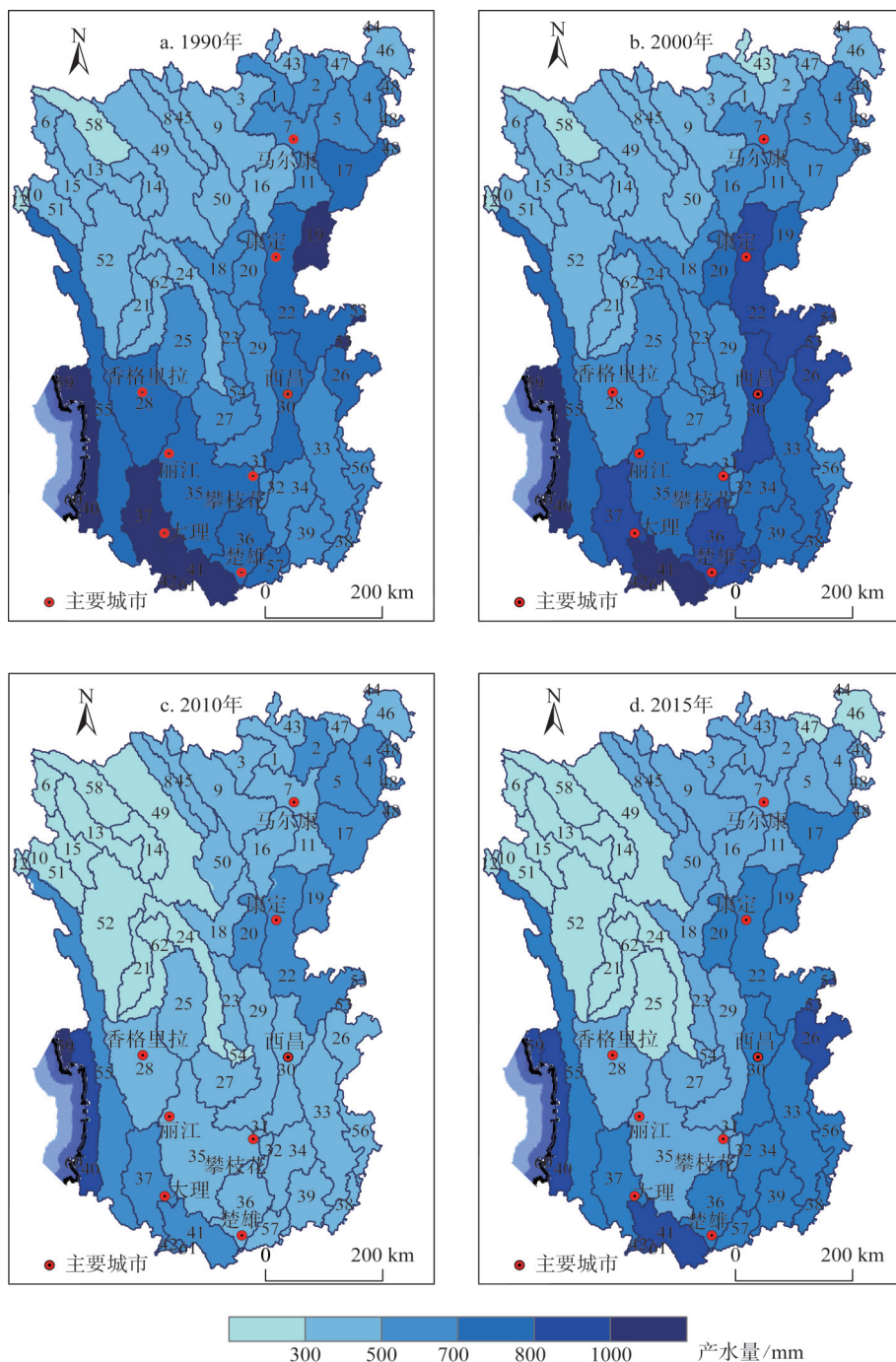


图9 横断山区子流域尺度产水量空间分布格局

Fig. 9 Spatial pattern of water yield on the sub-watershed scale in Hengduan Mountain region

海拔、坡度、降水量、潜在蒸散、实际蒸散、林地比例、草地比例等三大类共7个因子开展相关性分析(表1)。从空间格局上来看,在地形因素中,产水能力与海拔呈现显著的负相关关系,海拔显著地影响着降水量以及植被类型的分布,因此能够间接地影响产



表1 横断山区子流域平均产水量与气候、地形、土地覆被的相关性

Table 1 Correlation analysis of average water yield and climate, topography, and land cover in the sub-basins of Hengduan Mountain region

	时间/年	海拔	坡度	降水量	潜在蒸散	实际蒸散	林地比例	草地比例
产 水 深 度	2015	-0.749**	-0.18	0.942**	0.238*	-0.38	0.53**	-0.679**
	2010	-0.479**	0.145	0.946**	0.055	0.007	0.479**	-0.482**
	2000	-0.733**	-0.085	0.973**	0.49**	0.095	0.625**	-0.721**
	1990	-0.683**	0.018	0.961**	0.338**	0.060	0.649**	-0.722**
	1990-2010			0.983**	-0.132	0.008	0.052	-0.034
	2000-2010			0.995**	-0.650**	0.053	0.13	-0.173
	2010-2015			0.995**	-0.445**	0.206	0.181	-0.279*

注：\*、\*分别表示在0.01、0.05水平（双侧）上显著相关。

水能力。在气候因子中，与之前研究相似<sup>[11,22,39]</sup>，产水量与降水量呈现明显的正相关，而与潜在蒸散和实际蒸散相关性不明显。在土地覆被因子中产水量与林地比例呈现显著的正相关，而与草地比例呈显著的负相关，本研究中的产水量是降水量除去蒸散量的值，与草地相比，林地具有更高的枯落物持水量和林冠截留量<sup>[37,40]</sup>。在时间变化上，产水量的变化主要受到降水量变化的影响（ $r>0.98$ ， $P<0.01$ ）。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

横断山区产水服务不仅惠及山区当地居民，同时也是河流下游地区重要的生产、生活用水来源，是广大下游地区人类福祉的重要组成部分，而其时空分布格局及其影响因素的识别是山区水资源调配以及流域水资源管理的重要内容。本文在此背景下基于研究区1990-2015年近25年的数据构建了产水时空分异及影响因素识别的研究思路，提出了综合InVEST生态系统服务评估模型及相关分析等研究方法的“评估—分异—影响—对策”的研究框架，并得到以下主要结论：

（1）横断山区各年产水量空间格局相似，均表现为南高北低，主要的高值区位于山区西部三江并流区以及四川盆地的西南缘，低值区则主要集中于研究区西北部。产水量的空间格局分布与区域降水量及实际蒸散量具有空间吻合性。不同土地利用产水总量方面，林地、草地是主要贡献者，两者产水总量占全区的86.7%。产水能力一般与植被蒸散量呈反比，按照建设用地、耕地、林地和草地、未利用地依次降低。

（2）横断山区产水量在1990-2015年间呈现先增大后减小再增大的波动变化趋势，平均产水深度在420~620 mm之间变化。整体上1990年和2000年产水量处于高水平状态，2010年和2015年呈现低水平状态。产水深度变化与降水量及实际蒸散量的变化具有时间一致性。

（3）尽管产水量在时空变化上主要由降水量控制，但不能否认人类活动对其所产生的影响。在低海拔区域特别是海拔2000 m以下区域，应注意兼顾经济发展与生态保护，合理安排水资源；在高海拔地区未利用地分布是产水量减小的重要原因，此区域应注重生态保护，防止植被特别是草地的退化。在子流域尺度，林地比例与产水量呈现正

相关关系，因此要着重林地的保护，在尊重自然的前提下尽量提高林地覆盖率。

### 3.2 讨论

(1) 无论是空间分异还是时间变化方面，产水量的变化与降水量和实际蒸散量具有密切的关系。依据区域水量平衡，降水量和实际蒸散量是量化产水量的两个重要参数<sup>[12]</sup>，三者的分布具有空间吻合性(图4、图10)。横断山区西部三江并流区由于受到来自西南水汽的影响，是研究区降水量第一高值区域，空间格局呈现从西向东递减的趋势(图10a)；尽管该区域受到植被、气温、风速等多重因素的影响具有较高的实际蒸散量(图10b)，但由于充足降水的补给使得该区域的产水量也较高。四川盆地西南缘由于受到东亚季风以及东南季风的影响，形成了横断山区降水量空间分布的又一高值区，加之该区域实际蒸散量较小，因此形成了产水量的高值区。而研究区西北部，降水量为低值区，而实际蒸散量则为高值区，因此产水量偏低。

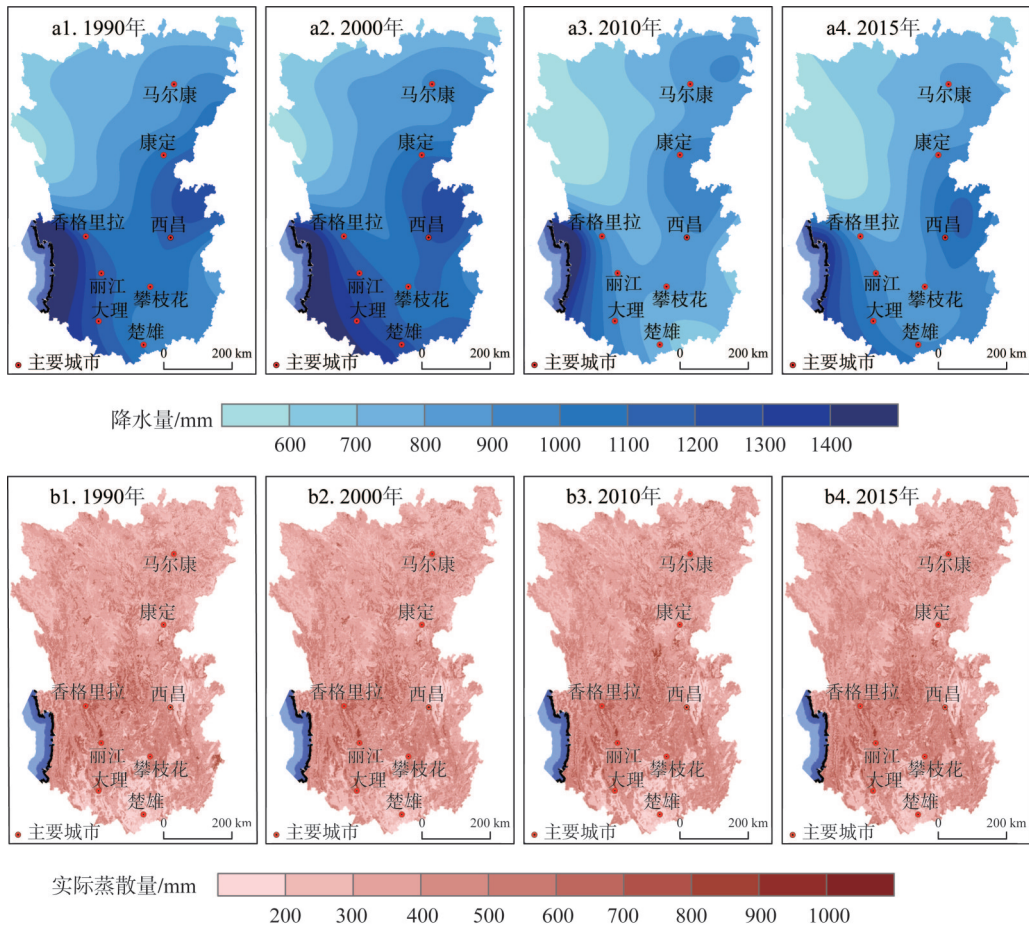


图10 横断山区1990-2015年降水量及实际蒸散量空间分布格局

Fig. 10 Spatial pattern of precipitation and actual evapotranspiration in Hengduan Mountain region

横断山区平均产水深度与该时段内降水量以及实际蒸散量的变化具有一致性(图4、图10)。1990-2015年，该区域降水量变化趋势与产水深度变化趋势一致。1990和2000年降水量较为充沛，约为963~986 mm；而2010年和2015年降水量则明显减少为800~819 mm。

已有关于我国西南地区年际降水量变化的研究<sup>[41]</sup>也表明2009年和2011年是降水量相对较少的年份,在2009年秋至2010年秋发生冬春连旱<sup>[42]</sup>、2011年西南地区发生秋冬连旱<sup>[43]</sup>;1998年、1999年是降水量比较多的年份,1998年川渝地区发生的洪涝灾害很好地体现了这一点。区域实际蒸散量尽管表现为增加趋势,但25年间增长率仅为4.4%,与降水量相比,其变化甚微。

(2) 垂直梯度上,产水能力随着海拔的增加呈现降低的趋势(图5)。低海拔区域具有较强的产水能力,建设用地是其中的一个重要贡献者,但值得注意的是建设用地的产水并不能够被直接利用。低海拔地区特别是低于2000 m的区域,同时也是人类活动最为广泛和剧烈的地区之一,是整个山区需水量较大的区域。因此在未来山区发展经济、城镇化建设过程中应合理安排水资源,兼顾生态发展。高海拔地区,未利用地的广泛分布是产水功能减弱的一个重要原因,高寒地区同时也是一个生态脆弱区,极易遭到破坏,因此该区域要重点防止植被退化以及未利用地的增加,应适当采取禁牧等生态措施防止草地面积减少及退化。在子流域尺度上,尽管从空间和时间变化两方面都表明降水量是产水服务变化的主要驱动因素,但并不能否认人类活动的影响,由于产水服务与林地比例之间存在着正相关的关系(表1),因此要着重林地的保护。

(3) 尽管InVEST模型的产水量模块得到了广泛的应用,但是还存在着一定程度的不确定性<sup>[44]</sup>。比如复杂的土地利用格局及下垫面地理环境可能导致更加复杂的水量平衡过程,但该模块未能将复杂地形纳入模型中<sup>[12]</sup>,不能对此类过程进行很好的刻画。同时在模型输入因子中,气象站点数量以及插值方法的选取都会对气象数据的空间表达产生一定的影响;本研究中,关于蒸散系数、最大根系深度等参数均来自于文献中经验数据,这些都将在一定程度上影响模型模拟的精度,但产水量的基本格局不会变。对于产水服务评估精度的提高,在进行参数当地化的同时,也应注意产水量的年内及季节产水量的模拟。同时产水量是山区多项生态系统服务中的一项服务,在提高山区生态质量的过程中要注意多项服务的综合效益,权衡各服务之间的关系。

(4) 本文提出“评估—分异—影响—对策”的研究框架,并据此开展相应的产水量研究,但是该框架只是对产水量时空变化的初步探讨,在后续的研究中需要进一步改进和完善。在探讨产水量变化的影响因子方面,本研究从气候、地形和土地利用类型等方面进行了因子筛选,忽略了社会经济因素对产水变化的影响,而相关分析的应用则从一定程度上预设了影响因素和产水量之间的线性关系,因此在今后的研究中一方面要结合社会文化要素进行较为全面的探讨;另一方面,在研究方法上要充分考虑影响因子与产水量之间的非线性关系并结合约束线、回归分析等方法开展相应研究,同时要注意探讨在不同尺度上产水量的驱动机制差异,并确定其特征及驱动机制突变的尺度阈值。

### 参考文献(References):

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington D.C.: Island Press, 2005.
- [3] FABER J H, VAN W J. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. *Science of the Total Environment*, 2012, 415(2): 3-8.
- [4] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 325-337. [CHEN W X, LI J F, ZHU L J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Mid-



- dle Yangtze River region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 325-337.]
- [5] 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. *地球科学进展*, 2015, 30(11): 1250-1259. [DAI E F, WANG X L, ZHU J J, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(11): 1250-1259.]
- [6] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016. [DAI E F, WANG X L, ZHU J J, et al. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs. *Geographical Research*, 2016, 35(6): 1005-1016.]
- [7] AJAZ AHMED M A, ABD- ELRAHMAN A, ESCOBEDO F J, et al. Spatially-explicit modeling of multi-scale drivers of aboveground forest biomass and water yield in watersheds of the Southeastern United States. *Journal of Environmental Management*, 2017, 199: 158-171.
- [8] SANCHEZ-CANALES M, BENITO A L, PASSUELLO A, et al. Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed. *Science of the Total Environment*, 2012, 440(1): 140-153.
- [9] 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. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 529-534. [ZHANG B, LI W H, XIE G D, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 529-534.]
- [10] 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. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1321-1329. [ZHANG F P, LI X J, FENG Q, et al. Spatial and temporal variation of water conservation in the upper reaches of Heihe River Basin Based on InVEST model. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(6): 1321-1329.]
- [11] 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. *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 wateryield and its driving factors in Nansi Lake Basin. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 669-679.]
- [12] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2015.
- [13] 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. [PAN T, WU S H, DAI E F, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 183-189.]
- [14] JIANG C, LI D, WANG D, et al. Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters region, China as a result of climate variability and land cover change. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 199-211.
- [15] WANG J, PENG J, ZHAO M, et al. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-Western Yunnan, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 57-64.
- [16] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078. [WANG P T, ZHANG L W, LI Y J, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the upper reaches of Hanjiang River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2064-2078.]
- [17] MILLY P C, DUNNE K A, VECCHIA A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 2005, 438(7066): 347-350.
- [18] COHEN S, KETTNER A J, SYVITSKI J P M. Global suspended sediment and water discharge dynamics between 1960 and 2010: Continental trends and intra-basin sensitivity. *Global and Planetary Change*, 2014, 115(11): 44-58.
- [19] BRAUMAN K A, DAILY G C, DUARTE T K, et al. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Social Science Electronic Publishing*, 2007, 32(1): 67-98.
- [20] ZIEGLER A D, SHEFFIELD J, MAURER E P, et al. Detection of intensification in global- and continental-scale hydrological cycles: Temporal scale of evaluation. *Journal of Climate*, 2003, 16(3): 535-547.
- [21] ENNAANAY D. Impacts of land use changes on the hydrologic regime in the Minnesota River Basin. Minneapolis: University of Minnesota, 2006.
- [22] 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. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3216-3223. [WU J, LI Y H, HUANG L Y, et al. Spatiotemporal variation of water yield and its driving factors in Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(11): 3216-3223.]

- [23] 樊杰. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201. [FAN J. Draft of major function oriented zoning of China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 186-201.]
- [24] 张荣祖, 郑度, 杨勤业, 等. 横断山区自然地理. 北京: 科学出版社, 1997. [ZHANG R Z, ZHENG D, YANG Q Y, et al. *Physical Geography of Hengduan Mountain Area*. Beijing: China Science Press, 1997.]
- [25] WANG Y, DAI E, YIN L, et al. Land use/land cover change and the effects on ecosystem services in the Hengduan Mountain region, China. *Ecosystem Services*, 2018, 34: 55-67.
- [26] 钟祥浩. 中国山地生态安全屏障保护与建设. 山地学报, 2008, 26(1): 2-11. [ZHONG X H. Study of protection and construction of mountain ecological security barrier in China. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(1): 2-11.]
- [27] 陆大道, 陈明星. 关于“国家新型城镇化规划(2014-2020)”编制大背景的几点认识. 地理学报, 2015, 70(2): 179-185. [LU D D, CHEN M X. Several viewpoints on the background of compiling the "National New Urbanization Planning (2014-2020)". *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 179-185.]
- [28] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴. 地理学报, 2018, 73(4): 637-650. [LIU Y S. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 637-650.]
- [29] CHEN L, XIE G, ZHANG C, et al. Modelling ecosystem water supply services across the Lancang River Basin. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(4): 322-327.
- [30] 林世伟, 武瑞东. “三江并流”区生态系统供水服务的空间分布特征. 西部林业科学, 2015, 44(3): 8-15. [LIN S W, WU R D. The spatial pattern of water supply ecosystem services in the Three Parallel Rivers region. *Journal of West China Forestry Science*, 2015, 44(3): 8-15.]
- [31] 杨勤业, 郑度. 横断山区综合自然区划纲要. 山地研究, 1989, 7(1): 56-64. [YANG Q Y, ZHENG D. An outline of physic-geographic regionalization of the Hengduan Mountainous region. *Mountain Research*, 1989, 7(1): 56-64.]
- [32] LIU J Y, ZHANG Z, XU X, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21<sup>st</sup> century. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [33] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [34] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971-2008年我国潜在蒸散时空演变的归因. 科学通报, 2010, 55(2): 2226-2234. [YIN Y H, WU S H, DAI E F. Spatial and temporal attribution of potential evapo-transpiration China during the period of 1971-2008. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(2): 2226-2234.]
- [35] ZHOU W, LIU G, PAN J, et al. Distribution of available soil water capacity in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 3-12.
- [36] 金小麟. 水源涵养的计量研究. 贵州林业科技, 1990, 18(3): 64-72. [JIN X L. Quantitative study on water conservation of forest. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 1990, 18(3): 64-72.]
- [37] FARLEY K A, JOBBAGY E G, JACKSON R B. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1565-1576.
- [38] 顾东娟. 长株潭城市群土地利用/覆被变化的水文水资源效应分析. 长沙: 湖南师范大学, 2014. [GU D J. Analysis on effects of land use and land cover change on hydrology and water resource in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Agglomeration. Changsha: Hunan Normal University, 2014.]
- [39] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 等. 东江湖流域水供给服务时空格局分析. 生态学报, 2016, 36(15): 4892-4906. [XU J, XIAO Y, XIE G D, et al. Spatiotemporal analysis of water supply service in the Dongjiang Lake Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4892-4906.]
- [40] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 等. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究. 自然资源学报, 2010, 25(4): 585-593. [LI S M, XIE G D, ZHANG C X, et al. Analysis on the function of conservation water of the Chinese forest ecosystem. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(4): 585-593.]
- [41] 周李磊, 杨华, 刘睿, 等. 基于TRMM数据的西南地区年降水时空特征研究. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2017, (1): 114-122. [ZHOU L L, YANG H, LIU R, et al. Spatial-temporal characteristics of annual precipitation in Southwest China based on TRMM 3B43 V7 data. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2017, (1): 114-122.]
- [42] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征. 地理学报, 2011, 66(9): 1179-1190. [HE J Y, ZHANG M J, WANG P, et al. Climate characteristics of the extreme drought events in Southwest China during recent

50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1179-1190.]

- [43] 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 85-92. [WANG M T, WANG X, HUANG W H, et al. Temporal and spatial distribution of seasonal drought in southwest of China based on relative moisture index. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(19): 85-92.]
- [44] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 等. 基于 InVEST 模型的白龙江流域水源供给服务时空分异. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1337-1347. [XIE Y C, GONG J, QI S S, et al. Spatio-temporal variation of water supply service in Bailong River Watershed based on InVEST model. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1337-1347.]

## Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain region

WANG Ya-hui<sup>1,2</sup>, DAI Er-fu<sup>1,2</sup>, MA Liang<sup>1,2</sup>, YIN Le<sup>1,2</sup>

(1. Lhasa Plateau Ecosystem Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In this study, we evaluated the water yield in the Hengduan Mountain region from 1990 to 2015 using the water yield module in the InVEST model; we further analyzed the corresponding spatial and temporal characteristics and influencing factors. The results show the following. First, water yield decreased with increasing altitude and tended to decrease from the southern to the northern areas. Second, water yield increased slightly from 1990 to 2000, decreased significantly from 2000 to 2010, and then increased slightly again from 2010-2015. Third, the average water yield varied greatly across different land use types: the water yield capacity of construction lands was the strongest, for about 550-920 mm; that of forests and grasslands were moderate, for about 438-650 mm and 412-580 mm, respectively; that of unused land and water areas were the weakest, for about 273-457 mm and 56-237 mm, respectively. Lastly, there exists a significant negative relationship between the water yield spatial pattern with elevation and grasslands proportion, while there is a positive relationship with precipitation and forests proportion. The temporal changes were attributed to the positive relationship with precipitation. Overall, this study promotes the development of mountain ES (ecosystem services) research, and the results provide scientific support for water resource management and sustainable development in the Hengduan Mountain region.

**Keywords:** ecosystem services; water yield; InVEST model; Hengduan Mountain region; spatiotemporal pattern