

# 横断山区产水服务空间异质性及归因分析

戴尔阜<sup>1,2</sup>, 王亚慧<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:** 包括产水服务在内的生态系统服务已被纳入区域土地利用规划以及可持续发展决策中, 识别其空间分异特征及影响因素是进行决策的基础, 而空间分异的定量归因研究仍需进一步加强。以空间异质性明显的中国横断山区为研究区, 借助InVEST模型模拟产水服务空间分布, 选择气候、地形、土壤、植被、土地利用等因子, 采用地理探测器开展产水服务空间异质性归因分析。结果表明, ① 气候类因子是产水服务空间异质性的主要控制因子, 其中以降水量和蒸散量为主。② 在不同地貌及气候分区中, 各因子对产水的空间分异的解释能力存在显著差异: 平缓地区, 蒸散量解释能力远高于降水量, 随着起伏度的增大, 降水量解释能力逐步增强, 最终成为主要因子; 在高原气候区, 以蒸散量解释能力最强, 而在中亚热带气候区, 降水量为主要的控制因子。③ 值得注意的是, 平缓地区土地利用类型因子的解释能力较为突出, 在山区发展中应注意土地利用的合理规划, 以减轻土地利用变化对产水服务空间变化的影响。④ 风险探测识别的产水服务重要区主要为初育土及人为土分布区、灌木林区以及坡度在 $\leq 5^\circ$ 和 $25^\circ\sim 35^\circ$ 区域, 而其对应的高程值则在不同区域之间存在差异, 因此, 在横断山区产水服务的维持与保护工作中应充分考虑不同分区的具体情况。

**关键词:** 产水服务; InVEST模型; 地理探测器; 归因分析; 横断山区

DOI: 10.11821/dlxb202003012

## 1 引言

生态系统服务是自然系统反馈于人类的重要资源, 是人类赖以生存和发展的资源与环境基础<sup>[1-2]</sup>, 生态系统服务的内涵、产生机制及其表达近年来得到了越来越多关注<sup>[3-5]</sup>, 成为了生态学及相关学科研究的前沿与热点<sup>[1, 6]</sup>。产水服务作为一种重要的生态系统服务, 对于维持生态系统稳定以及提高人类福祉具有重要意义。一方面, 产水服务通过提供充足的生产生活用水以及发挥其娱乐、美学价值等直接地影响人类福祉<sup>[7]</sup>; 另一方面, 产水服务形成过程中的水文循环过程通过影响碳循环、植被生长等过程增强或抑制其他服务的表达, 通过与其他服务的权衡、协同关系间接地影响人类所能获取的福利<sup>[8]</sup>, 比如在一定的阈值范围内, 产水服务的增加能够在一定程度上促进土壤保持服务以及固碳服

收稿日期: 2018-12-20; 修订日期: 2019-12-16

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(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) [**Foundation:** National Basic Research Program of China, No.2015CB452702; National Natural Science Foundation of China, No.41571098, No.41530749; National Key R&D Program of China, No.2017YFC1502903; Major Consulting Project of Strategic Development Institute, Chinese Academy of Sciences, No.Y02015003]

**作者简介:** 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@igsnr.ac.cn

**通讯作者:** 王亚慧(1990-), 女, 山西长治人, 博士, 研究方向为土地利用及生态过程。E-mail: wangyah.15b@igsnr.ac.cn

务的发挥<sup>[9-10]</sup>。横断山区是怒江、澜沧江、金沙江等多条国内、国际大河的上游地区,复杂的地形致使河道落差较大,使得该区成为中国淡水资源和水电能源的主要供给地<sup>[11]</sup>。产水服务的空间流动性使其不仅在横断山区范围内具有一定的自我消费,同时还具有大面积的区域外服务“溢出”的惠及范围<sup>[12]</sup>,该服务对于保障中国西南及毗邻东南亚国家用水及维持区域生态安全具有重要作用。

生态系统服务概念、价值、权衡等研究越来越多地被应用于区域土地利用规划和决策中<sup>[13-16]</sup>,而识别生态系统服务的空间分异及其驱动力是空间决策的基础。目前,针对生态系统服务空间异质性的研究,一方面是对其空间分异程度的表征,如通过采用变异系数、泰勒指数等消除单位和平均数对不同结果的影响后来测度生态系统服务的空间差异大小<sup>[17]</sup>;或是借用自然以及人为设定的生态学“梯度”概念分析生态系统服务沿各梯度变化的空间差异<sup>[18]</sup>。另一方面则是通过回归模型的建立确定不同空间位置生态系统服务及其影响因子的关系,如Ahmed等<sup>[8]</sup>以及侯文娟等<sup>[19]</sup>采用地理加权回归的方法分析了生态系统产水、净初级生产力等服务与气候、土地利用、景观指数等因子的关系。尽管上述研究从生态系统服务空间差异的测度及影响因素等方面开展了相应研究,但对于其空间分异主要控制因子的探究以及不同因子叠加贡献率的研究尚显缺乏,而地理探测器方法<sup>[20]</sup>则可以通过一组统计学方法解释要素空间分异的背后驱动力,同时探测两因子交互作用对要素的解释力。该方法既可以探测数值型数据,也可以探测定性数据,因此在人类健康<sup>[21]</sup>、社会经济<sup>[22]</sup>、环境科学<sup>[23]</sup>、生态景观<sup>[24]</sup>等方面得到了广泛的应用。

景观异质性直接影响着生态系统中物种动态、群落结构以及生态过程,并最终影响生态系统服务的表达<sup>[25]</sup>。在横断山区,景观异质性则更为复杂,垂直方向气温、降水等气象要素组合下形成的景观垂直梯度,随水平方向经度、纬度空间位移而异。相应地,横断山区产水服务具有水平和垂直双重方向异质性,而城市建设、资源开发利用等人类活动则进一步增强了产水服务的空间分异。目前,横断山区内部及周围区域产水服务的研究多集中于产水服务的评估与空间化制图<sup>[11, 26-27]</sup>,而缺乏对其空间异质性的关注及其归因分析研究。尽管产水服务多模型的应用已证明其是气候、地形以及土地利用等要素综合作用的结果,但是究竟哪种因子或是哪两种因子的综合作用是产水服务空间分异的主要控制因子尚未明晰。横断山区地貌、气候类型复杂多样,在其不同组合下产水服务的空间异质性更为明显。因此,本文在地貌及气候分区的背景下,选择气候、地形、土壤、植被以及土地利用类型等影响因子,借助地理探测器方法探索产水空间分异特征及其归因,为山区合理配置水资源及生态安全提供科学依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

横断山区(24°39'N~33°34'N、96°58'E~104°27'E)位于中国西南地区,总面积约为44.97万km<sup>2</sup>,行政区划上主要包括中国西藏自治区东部、四川省西部以及云南省的东北部,地势整体上表现为由西北向东南倾斜,地貌类型多样(图1)。研究区是中国及东南亚主要河流的上游区域,水网发达。该区域气候区划上主要包括有高原气候区的昌都区和波密—川西区以及中亚热带的四川区、滇北区和金沙江—楚雄、玉西区(图1)。自然条件的分明差异使得植被类型空间分异明显,从低海拔的干旱河谷灌草丛到亚冰雪带的高山稀疏植被均有分布<sup>[28]</sup>,其垂直带谱随着水平地带的不同而变化。土壤类型则涵盖了红壤、棕壤、褐土以及高山土壤等四大土壤系列。植被以及土壤的空间分异及其组合都

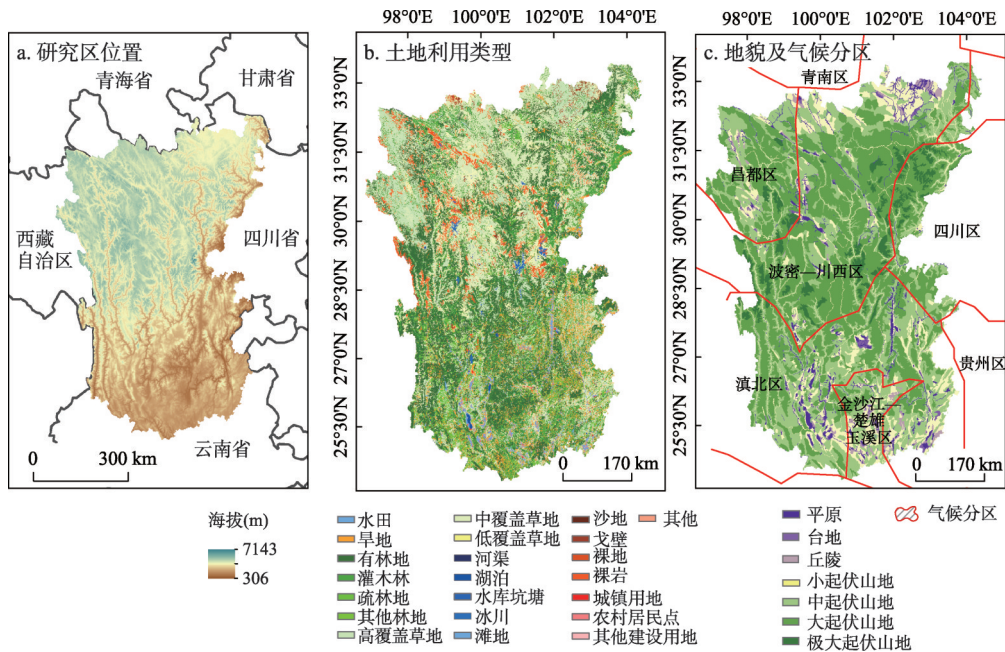


图1 横断山区区位、土地利用及地貌、气候分区

Fig. 1 Location, land use type, geomorphology and climate division of Hengduan Mountain region

将通过影响水分蒸散等水循环过程而影响产水量的供给,并导致产水服务的空间分异。

## 2.2 数据来源与处理

依据InVEST模型产水模块以及地理探测器构建需要,本文所需的遥感数据主要包括气象数据、数字高程模型(DEM)、气候区划数据、土壤数据、土地利用数据、归一化植被指数(NDVI)、地貌类型数据以及水文数据。气象数据主要包括气温、降水、辐射、风速、日照时间等,均来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)。由研究区内部及周围共42个站点的气象数据经过专业气象插值软件ANUSPLIN处理得到分辨率为1 km的栅格数据。DEM、气候区划数据和土壤数据均来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),其中DEM是构建研究区小流域以及坡度的基础数据,土壤属性包括土壤分类系统中的名称、土壤深度、土壤质地、土壤有机质等。土地利用数据主要来自于对30 m遥感影像的解译,参考刘纪远等<sup>[29]</sup>的土地利用分类体系,研究区土地利用类型被分为22个小类(图1),经过实地验证,该数据分类精度达到91.04%,能够满足本研究的需求。NDVI来自于美国陆地过程分布式数据档案中心(<https://lpdaac.usgs.gov/>)的MOD13A3数据产品,时间分辨率为1月,空间分辨率为1 km。地貌类型数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),依据周成虎等<sup>[30]</sup>的地貌分类体系将研究区地貌类型数据按照基本地貌形态类型的起伏度进行合并,最终分为平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地以及极大起伏山地7类(图1)。水文数据主要用于模型模拟数据的验证,来自于《中华人民共和国水文年鉴——长江流域水文资料》中18个站点2006—2015年的径流量数据。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 研究框架

本文以横断山区产水服务的空间异质性及归因分析为视角,以期探索影响其空间异质性的驱动因子,构建了研究框架(图2):①结合空间化的基础数据以及InVEST模型



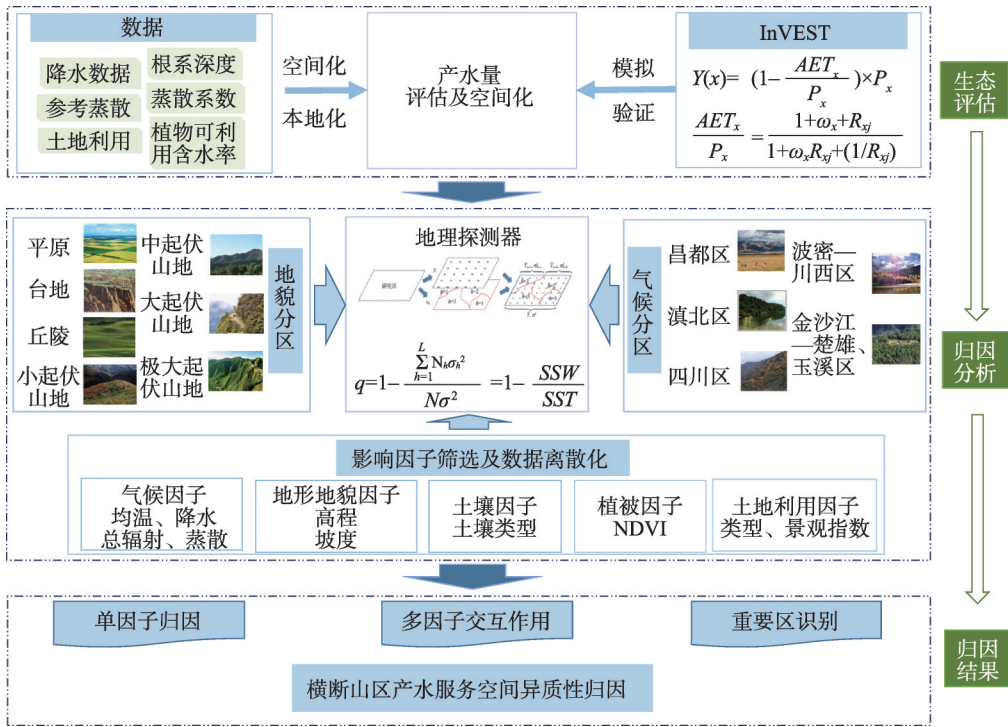


图2 横断山区产水服务空间异质性归因研究框架

Fig. 2 Framework for the spatial heterogeneity and driving mechanism of water yield service in Hengduan Mountain region

的产水模块对横断山区的产水量服务进行模拟及定量评估，并对结果进行验证；② 地形起伏度和气候的差异是山区各要素空间异质性的基础，因此本文在筛选因子的基础上分别从不同地貌分区以及不同气候分区的角度，采用地理探测器对产水量的空间异质性进行归因分析；③ 通过“因子探测”和“生态探测”区分单因子对产水空间分异的影响程度，通过“交互作用探测”确定因子交互作用对产水空间分异的影响，最后通过“风险区探测”识别产水服务的重要区。

**2.3.2 基于 InVEST 模型的横断山区产水服务模拟** InVEST 模型中产水服务模块基于 Budyko 水热耦合平衡假设计算年尺度的产水量<sup>[31]</sup>：

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

式中： $Y_{sj}$ 为土地覆被类型  $j$  上栅格单元  $x$  的年均产水深度； $AET_{sj}$ 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。 $AET_{sj}/P_x$ （实际蒸散量与降水量比值）按照 Zhang 等<sup>[32]</sup>在 Budyko 曲线基础上改进的方法进行计算：

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

$$\omega_x = Z \times \frac{PAWC_x}{P_x}, \quad R_{sj} = \frac{k_{ij} \times ET_0}{p_x} \quad (3)$$

式中： $R_{sj}$ 为土地覆被类型  $j$  上栅格单元  $x$  的 Budyko 干燥指数； $\omega_x$ 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>[32]</sup>； $PAWC_x$ 是植物可利用含水量<sup>[33]</sup>； $k_{ij}$ 是植物蒸散系数。

**2.3.3 应用地理探测器辨识横断山区产水空间异质性影响因素** 地理探测器是揭示各要素空间分异驱动力的一组统计学方法<sup>[20]</sup>。其基本思想是如果自变量与因变量的空间分布具有相似性,那么该自变量对因变量就具有重要的影响<sup>[34-35]</sup>,相似性越大,影响程度也越大。本文以横断山区产水服务为因变量,分别在不同的地貌以及气候分区中采用地理探测器来确定影响其空间分异的主要因子。在影响因子方面,综合考虑了自然和人为要素,自然要素中考虑了气候、地形地貌、土壤、植被,在人为要素方面则以土地利用类要素作为主要的因子,最终共选取了15个因子作为自变量(表1)。土地利用类因子中,除去土地利用类型外,还增加了有关土地利用组成和结构的指标,用景观指数表示。在景观水平选择香农多样性指数(SHDI)、蔓延度指数(CONTAG)以及有效粒度尺寸(MESH)分别表示景观的多样性、聚集度以及破碎度;在景观类型水平上,选择横断山区3种主要的土地利用类型(耕地、林地、草地)的斑块所占景观面积比例(PLAND)指数代表土地利用的组成。本研究借助景观格局分析软件Fragstats<sup>[36]</sup>中的“滑窗”功能计算所有景观指数。按照5 km间隔共生成16925个点以进行多因子空间关联。

表1 横断山区产水服务空间分异影响因子

Tab. 1 Driving factors for water yield spatial heterogeneity in Hengduan Mountain region

类型	指标	数据类型	类型	指标	数据类型
气候	年均温	连续	土地利用	土地利用类型	离散
	年总降水量	连续		SHDI	连续
	年总辐射	连续		CONTAG	连续
	年实际蒸散量	连续		MESH	连续
地形地貌	高程	连续	PLAND(耕地)	连续	
	坡度	连续	PLAND(林地)	连续	
土壤	土壤类型	离散	PLAND(草地)	连续	
植被	NDVI	连续			

总体上,地理探测器可以分为4个模块:因子探测器、生态探测器、风险探测器以及交互作用探测器,4个探测器分别从不同层面以及不同角度研究要素的空间分异现象。

因子探测器:探测因变量的空间分异性,明确不同影响因子对产水量空间分异的解释程度,通过比较产水量的层内方差与层间总方差来确定其分异性大小,用 $q$ 值表示<sup>[34]</sup>:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2$$

式中: $h$ 表示产水量或是气候、地形地貌、土壤、植被及土地利用等影响因子的分层状况(Strata),共有 $L$ 层(地理探测器要求输入变量均为类别数据,参考王劲峰等提出的数据离散化方法及经验将坡度数据按照 $\leq 5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 8^\circ$ 、 $8^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 35^\circ$ 、 $> 35^\circ$ 分为6级,NDVI指数按照自然断点法分为7级,其他因子则按照自然断点法分为9级。在整个山区、不同地貌分区以及不同气候分区,产水服务空间分异影响因子均采用一致的分级标准); $SSW$ 和 $SST$ 分别表示不同层内方差之和以及全区总方差; $N_h$ 和 $N$ 分别表示 $h$ 层内和全区的单元数; $\sigma_h^2$ 和 $\sigma^2$ 分别是 $h$ 层内和全区的产水量的方差。 $q$ 值表示自变量解释了 $(100 \times q)\%$ 的产水量的空间异质性,其值越大表明解释能力越强,其显著性可通过地理探测器软件<sup>[20]</sup>进行检测。

生态探测器：比较两个自变量因子对于产水量空间分异影响程度是否具有显著差异。实际中两个自变量因子的 $q$ 值差别不大，难以进行区分时，可以借助此探测器进行判断，一般用F统计量来衡量：

$$F = \frac{N_{X1} \times (N_{X2} - 1) \times SSW_{X1}}{N_{X2} \times (N_{X1} - 1) \times SSW_{X2}} \quad (5)$$

风险探测器：通过 $t$ 检验可以判断不同分层间的产水量空间分异是否具有显著差异。

$$t_{y_{h=1} - y_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[ \frac{Var(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{Var(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (6)$$

式中： $\bar{Y}_h$ 表示 $h$ 层内的属性均值； $Var$ 表示方差。

交互作用探测器：评估两个不同自变量同时作用时对产水量空间分异的解释能力。交互作用类型如下：若 $q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$ ，表现为非线性减弱； $\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$ ，表现为单因子非线性减弱； $q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$ ，表现为双因子增强；若 $q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$ ，两个自变量则为独立关系；若 $q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$ ，则表现为非线性增强。

## 3 结果分析

### 3.1 横断山区产水服务空间分布

2010年横断山区产水深度变化范围为0~1619 mm，山区平均产水深度为420 mm。重建以具有水文观测数据的水文站点为出水口的小流域，并对比模拟及观测的小流域径流总量以进行模拟产水服务的验证，结果表明，两者具有较高的相关性，相关系数高达0.9947，说明该模拟值能够用于产水服务空间异质性归因分析研究。产水服务具有一定的空间异质性，以研究区西部三江并流区产水深度最大，东部的四川盆地西南缘的越西县、美姑县、昭觉县一带为次高值区，而西北部的察雅县、贡觉县、芒康县等区域为主要的低值区（图3）。

### 3.2 产水服务空间分异的单因子归因

整个横断山区，降水和实际蒸散对产水服务空间异质性的解释能力最高，分别为58.9%和26.7%，明显高于其他因子的解释能力，同时生态探测器显示两者对产水量空间分布的影响具有显著差异（图4）。解释能力在10%~15%之间的因子对产水量空间异质性的影响按照土地利用类型（14.7%）、太阳辐射（14.5%）、高程（12.6%）、土壤类型（11.08%）的顺序依次降低，除去土地利用类型与太阳辐射、高程与土壤类型外，其他因子两两对产水量空间分布影响具有显著差异。<10%解释能力的因子中以NDVI和年均温解释能力最强，两者差异不显著。其他因子的解释能力极其有限。从不同类的因子解释能力来看，气候类因子的解释能力最强，且存在显著的差异；土地利用类因子中，土地利用的类型要比植被的长势、土地利用的组成及结构等对产水量空间差异的影响大；在地形地貌因子中，海拔则具有较为重要的影响。

在不同的地貌分区，影响产水量空间分布的因子在类别及影响程度上存在显著差异（图4），比如高程因子在台地地区对产水空间分布解释力不显著，而在丘陵地区却可达26.1%；土地利用类型因子在中起伏山地地区解释力仅为11.9%，而在台地地区却高达53.3%。总体来说，与山区整体类似，气候类因子解释力最强，其中降水和实际蒸散量贡献率最高，但气温解释力可忽略；土地利用类因子中，土地利用结构和组成因子解释能

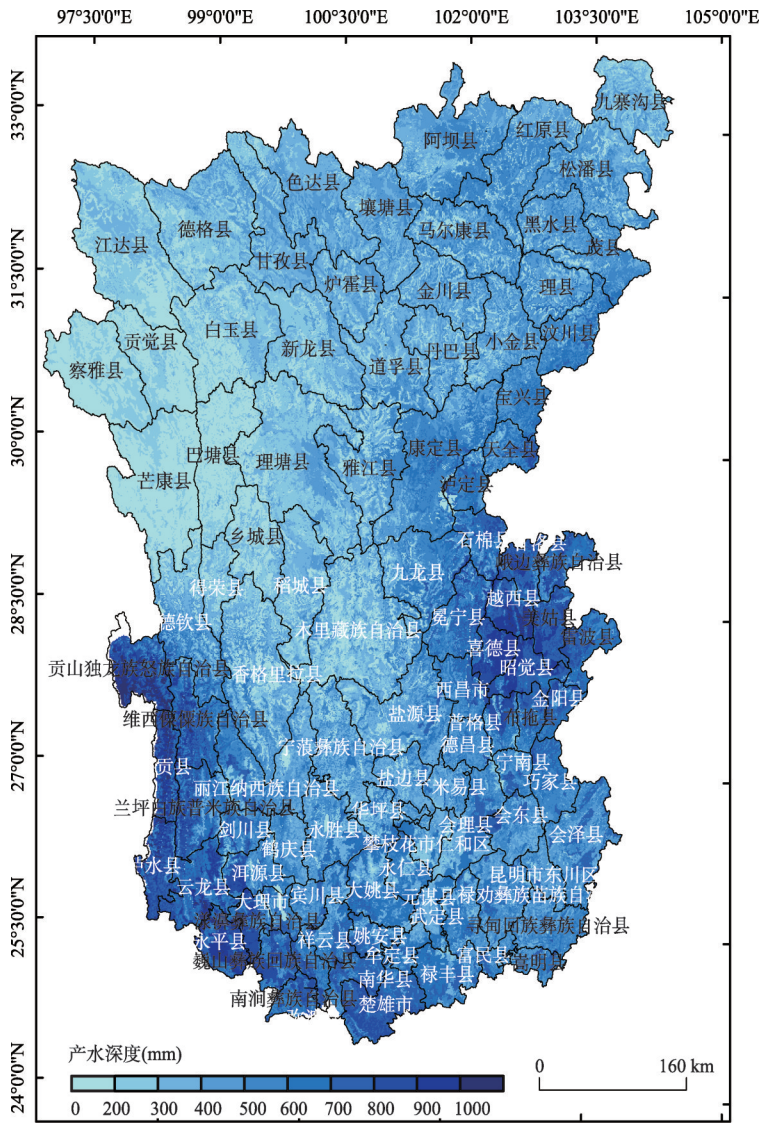


图3 横断山区产水服务空间分布

Fig. 3 Spatial pattern of water yield service in Hengduan Mountain region

力有限, 均小于10%。地形平缓的平原和台地地区, 实际蒸散量和土地利用类型因子是影响产水量空间分布的主要因子, 并与其他因子具有显著差异, 这可能与在小尺度降水量较为均一, 实际蒸散量和植被类型成为影响产水量的主要因子有关。随着地形起伏度的增加, 在丘陵地区, 实际蒸散量解释能力最大, 降水量的解释能力有所提高, 并显著高于其他因子。随着地形起伏度的继续增大, 降水量对产水量的影响逐渐增大, 在小起伏山地区至极大起伏区, 降水量已超过实际蒸散量, 分别成为控制产水空间格局的第一、第二因子, 并明显高于其他环境因子; 在平缓地区主要的控制因子之一土地利用类型因子的解释力则明显降低。

横断山区不同气候分区内产水量空间分布的主控因子也存在差异, 但实际蒸散量、降水量以及土地利用类型仍是主要的影响因子(图4)。在属于高原气候区的昌都区、波密一川西区, 实际蒸散量是解释力最强的因子, 明显高于土地利用类型和降水量的影



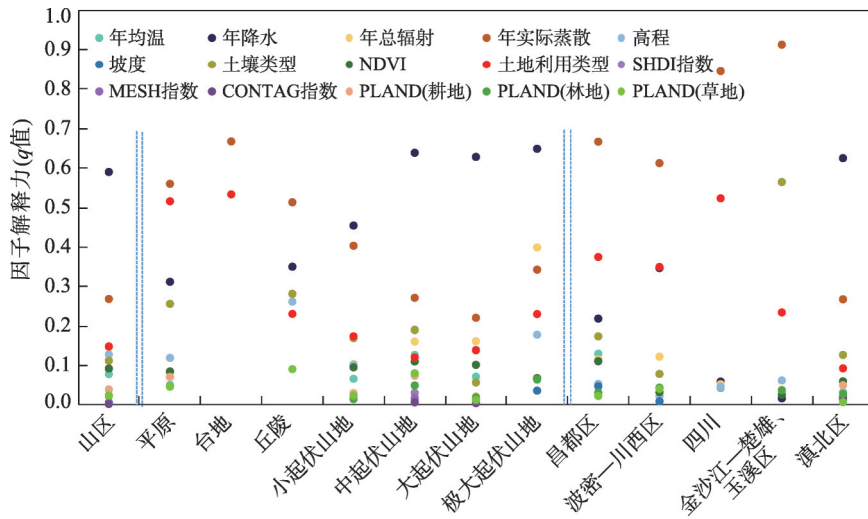


图4 横断山区不同分区各因子对产水服务空间异质性的影响程度

Fig. 4 Influence of different driving factors on spatial heterogeneity of water yield in different climatic and geomorphologic zones

响。该区属于半湿润区，在横断山区中为降水量的低值区，且降水量空间异质性较弱，因此区域的蒸散量成为影响产水量的重要因子，植被类型、根系深度等生理特征则通过影响植被的蒸散系数间接影响产水空间分布。尽管同属中亚热带，但在滇北区、四川区以及金沙江—楚雄、玉溪区，影响产水量的因子存在差异。在滇北区，降水量充足，且具有明显的空间异质性，以西部的三江并流区为高值区，向东依次递减，降水量在600~1800 mm不等，强烈的降水空间分异成为主要控制因素，解释力为62%，明显高于实际蒸散和太阳辐射的解释力（27%），土壤类型解释能力有限，仅为13%，而土地利用类型对产水空间分布的影响可以忽略。在四川区和金沙江—楚雄、玉溪区最具影响力的因子则是实际蒸散量，同时土地利用类型也具有相当的作用，主要是由于小尺度均一化了降水的空间异质性，而使得实际蒸散成为主导因子。总体来看，在高原气候区，蒸散和土地利用类型为主导因子；中亚热带地区，降水丰富，其解释力也明显高于蒸散。

3.3 产水服务空间分异影响因子交互作用

上述内容分析了单个因子对产水空间分布的影响程度，但实际过程中，是多种因子之间的复杂相互作用共同决定了产水量的空间格局。多因子两两交互探测也证明了无论是在整个横断山区还是在各分区内，因子交互作用对产水量空间分布格局的影响均高于单个因子的影响程度，表现为双因子增强和非线性增强（表2）。在山区尺度以及各分区内，气候类因子内部各因子之间的交互作用解释能力最强，其次是气候类因子与土地利用类因子的交互。其中降水量与蒸散量的交互作用影响均为最大值，解释力可达97%，说明在同一降水（蒸散）层级内，即使降水量（蒸散量）相似，实际蒸散（降水量）的空间差异也会显著增强产水量的空间异质性。第二、三主导交互作用在不同分区中具有一定的差异性，但均是降水或蒸散因子叠加其他因子。在不同地貌区，降水与土地利用类型交互作用具有较高的影响，解释力在70%~90%之间。高原气候区（昌都区和波密—川西区），实际蒸散与其他因子的交互作用均具有较高解释能力，约为60%~70%，其中以实际蒸散与太阳辐射的交互最为显著。在中亚热带气候区中，四川区和金沙江—楚雄、玉溪区实际蒸散与土地利用类型交互作用较强，而在滇北区降水与土地利用类型交互作用仅次于降水与蒸散交互。



表2 不同地貌、气候类型区产水服务空间影响因子交互作用探测

Tab. 2 The dominant interactions between two driving factors in different climatic and geomorphologic zones in Hengduan Mountain region

分区	主要交互作用		
整个山区	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	降水 $\cap$ 土壤类型
平原	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	蒸散 $\cap$ 土壤类型/蒸散 $\cap$ 高程
台地	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	蒸散 $\cap$ MESH指数
丘陵	降水 $\cap$ 蒸散	蒸散 $\cap$ 高程	降水 $\cap$ 土地利用类型
小起伏山地	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	降水 $\cap$ 土壤类型
中起伏山地	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	降水 $\cap$ 土壤类型
大起伏山地	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	降水 $\cap$ 土壤类型
极大起伏山地	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	降水 $\cap$ PLAND(草地)
昌都区	降水 $\cap$ 蒸散	蒸散 $\cap$ 其他因子	
波密—川西区	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	蒸散 $\cap$ 其他因子
四川区	降水 $\cap$ 蒸散	蒸散 $\cap$ 土地利用类型	
金沙江—楚雄、玉溪区	降水 $\cap$ 蒸散	蒸散 $\cap$ 土地利用类型	
滇北区	降水 $\cap$ 蒸散	降水 $\cap$ 土地利用类型	降水 $\cap$ 土壤类型

### 3.4 产水服务重要区识别

产水量与各环境因子存在着线性或非线性相关关系, 通过采用风险探测能够明确产水在各因子不同层级的程度, 并依据各层级间的差异显著性(置信水平95%)确定产水高值区(表3)。由于土地利用类因子中土地利用组成及结构因子对产水空间分布的贡献率极为有限, 因此这里不再对其进行分析。无论在整个山区还是各分区中, 随着降水量的增加以及蒸散量的减小, 产水深度均表现为增加趋势。而温度对产水量的影响则较为复杂。

各分区中, 除去四川区外, 随着NDVI值的增加产水量也呈增加的趋势, 这与茂密植被能够截留更多降水具有一定关系。土壤类型中, 基本以初育土和人为土分布区产水深度最高。各土地利用类型中, 建设用地的产水深度最大, 但该产水量并不能直接被人类利用, 植被覆盖区产水量最高的土地利用类型为灌木林。除去台地、丘陵以及气候分

表3 横断山区不同分区产水服务重要区识别

Tab. 3 Identification of water yield important areas in different climatic and geomorphologic zones in Hengduan Mountain region

分区	高程(m)	坡度( $^{\circ}$ )	土壤类型	NDVI	土地利用类型
整个山区	1591~2484	25~35	初育土	0.78~0.94	灌木林
平原	2069~2484			0.72~0.78	灌木林
台地	2069~2484		初育土	0.78~0.94	灌木林
丘陵	3377~3797		初育土	0.78~0.94	疏林地、灌木林
小起伏山地	2069~2484	25~35	初育土	0.78~0.94	灌木林
中起伏山地	2069~2484	25~35	初育土	0.78~0.94	灌木林
大起伏山地	2069~2484		初育土	0.78~0.94	灌木林
极大起伏山地	2924~3377	25~35		0.78~0.94	灌木林
昌都区	3797~6808	0~5	初育土	0.78~0.94	灌木林
波密—川西区	347~1591	0~5	初育土、人为土	0.78~0.94	灌木林
四川	347~1591	0~5	初育土、人为土		灌木林、其他林地
金沙江—楚雄、玉溪区	1591~2069	0~5	初育土	0.72~0.78	灌木林
滇北区	3797~4548	25~35	初育土	0.78~0.94	低覆盖度草地

区中滇北区外,产水深度随着海拔的增加逐渐降低,与不同海拔土地利用类型的分布具有一定关系。坡度对产水深度的影响则较为复杂和不一致,与不同区域的特定环境有关。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

生态系统服务空间异质性及其影响因子的识别是生态系统服务研究的重要内容,同时也是区域资源环境承载力评价及国土空间规划的科学依据。横断山区是中国主要河流的上游区域,其复杂的地形以及多样的气候类型在一定程度上增加了产水服务空间异质性的复杂程度。本文通过构建基于地貌和气候分区的山区产水服务空间异质性归因分析的研究框架,在InVEST模型模拟横断山区产水服务的基础上,采用地理探测器方法辨识了产水服务空间分异的主要影响因素,识别了产水服务重要区,主要得到以下结论:

(1) 气候类因子对产水量空间差异的解释力最强,以降水量和蒸散量为主,气温解释力极为有限。

(2) 在不同地貌分区,各因子对产水空间分异的解释能力存在显著差异。平缓地区(平原、台地地区),以蒸散的解释力最强,其次是土地利用类型,该区域应注意土地利用类型的转移及变化。随着起伏度的增大(小起伏山地至极大起伏山地),降水的解释能力逐渐增强,该区域则主要受到气候因子的影响,土地利用类因子解释力明显降低。

(3) 各因子对产水空间分异的解释程度随气候分区而异。其中在高原气候区(昌都区和波密—川西区),蒸散量解释能力最强,并与其他因子交互作用最为显著;在中亚热带气候区(面积较大的滇北区),降水超过蒸散成为主要的控制因子,同时土地利用类型与其他因子的交互作用较强,因此该区域也应该注意土地利用类型的变化。

(4) 通过风险探测识别了产水服务重要区的分布情况。整个山区初育土以及人为土分布区、灌木林分布区以及坡度 $\leq 5^\circ$ 和 $25^\circ\sim 35^\circ$ 区域为产水高值区。而产水重要区的高度分布上在不同气候、地貌分区内差别较大:平原、台地、小起伏、中起伏、大起伏山地高值区均位于2069~2484 m,丘陵区为3377~3797 m,极大起伏山地为2924~3377 m;气候分区中波密—川西区和四川区内产水高值区分布较低,为347~1591 m,金沙江—楚雄、玉溪区为1591~2069 m,滇北区和昌都区分布较高,分别为3797~4548 m和3797~6808 m。

### 4.2 讨论

生态系统服务是多种因子共同作用的结果,而多因子的耦合机制以及确定各因子的贡献程度仍然是一个具有挑战性的难题,本研究尝试用地理探测器的方法明确产水服务空间分异的主控因子。无论是单因子分析还是因子交互作用分析均表明气候因子是影响产水空间异质性的主要驱动力,这与已有研究的结果一致<sup>[37-38]</sup>,在不同的分区中,降水量与蒸散量交替成为主要的控制因子(图3)。尽管该结果强调了气候因子的驱动作用,但不能否认其他因子对产水空间分异的贡献能力。在地形起伏较小的平原、台地和丘陵地区,土地利用类型是位于降水和蒸散之后的主要影响因素,特别是在平原和台地地区,其贡献率超过50%(图4)。该区域同时也是城市、耕地以及其他基础设施的主要分布区域,是未来山区新型城镇化建设<sup>[39]</sup>、乡村振兴<sup>[40]</sup>等政策的主要落实区,土地利用类型的空间分布也会随之发生变化,因此未来的城市及经济发展过程中,要特别关注土地的集约化利用及合理规划,尽量减小其对山区产水服务的影响。尽管已有研究表明景观格局对生态系统服务的表达存在某种促进或抑制作用<sup>[41-42]</sup>,但本研究中各景观指数对产水空间分异的影响都极为有限(均小于10%)。这种不一致性可能与研究尺度有关,本文研究单

元为1 km×1 km,在一定程度上会掩盖土地利用结构空间差异的微小信息;另一方面,在计算景观指数的过程中对滑动窗口大小的选择也会在一定程度上影响研究结果。后续的研究中应从更为微观的尺度着手,在明确土地利用结构尺度效应的基础上进一步开展景观结构对生态系统服务的影响研究。

在整个产水服务评估过程中存在着一定的不确定性。气象数据的空间分布会受到气象站点选择、插值方法等因素的影响,而在具有垂直效应的山地地区,插值方法的选取将会增大这种不确定性。其次,InVEST模型的产水模块未能将复杂地形的影响纳入其中,同时,本文只分析了一年的产水服务,而忽略了产水的年内及年际变化情况,今后的研究应该更加着眼于产水服务时间尺度的评估及分析。揭示土地利用结构对产水服务空间异质性的影响是研究的难点,在今后研究中应从不同尺度开展产水空间分异归因的研究,以期揭示产水空间分异影响因素的尺度依存问题。

### 参考文献(References)

- [1] Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6): 571-576. [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. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.]
- [2] Daily, G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997.
- [3] Díaz S, Demissew S, Carabias J, et al. The IPBES conceptual framework: Connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 14: 1-16.
- [4] TEEB. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands*. IEEP, London and Brussels; Ramsar Secretariat, Gland, 2013.
- [5] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington DC: Island Press, 2005.
- [6] Li Wenhua, Zhang Biao, Xie Gaodi. Research on ecosystem services in China: Progress and perspectives. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 1-10. [李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2009, 24(1): 1-10.]
- [7] Sánchez- 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.
- [8] 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.
- [9] Qian Caiyun, Gong Jie, Zhang Jinxi, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 868-879. [钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.]
- [10] Jiang C, Zhang H, Zhang Z. Spatially explicit assessment of ecosystem services in China's Loess Plateau: Patterns, interactions, drivers, and implications. *Global and Planetary Change*, 2018, 161: 41-52.
- [11] Lin Shiwei, Wu Ruidong. 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. [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.]
- [12] Liu Moucheng, Sun Xueping, Lin Huifeng, et al. Establishment of eco-compensation fund based on the consumption of ecosystem services for Beijing-Chengde. *Resources Science*, 2015, 37(8): 1536-1542. [刘某承, 孙雪萍, 林惠凤, 等. 基于生态系统服务消费的京承生态补偿基金构建方式. *资源科学*, 2015, 37(8): 1536-1542.]
- [13] Hu Y, Peng J, Liu Y, et al. Integrating ecosystem services trade-offs with paddy land-to-dry land decisions: A scenario approach in Erhai Lake Basin, Southwest China. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 849-860.
- [14] Guerry, A D, Polasky S, Lubchenco J, et al. Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112: 7348-7355.
- [15] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom. *Science*, 2013, 341: 45-50.
- [16] Goldstein, J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109: 7565-7570.
- [17] Liu Chunfang, Wang Chuan, Liu Licheng. Spatio-temporal variation on habitat quality and its mechanism within the



- transitional area of the Three Natural Zones: A case study in Yuzhong count. *Geographical Research*, 2018, 37(2): 419-432. [刘春芳, 王川, 刘立程. 三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制: 以榆中县为例. *地理研究*, 2018, 37(2): 419-432.]
- [18] Larondelle N, Haase D. Urban ecosystem services assessment along a rural-urban gradient: A cross-analysis of European cities. *Ecological Indicators*, 2013, 29: 179-190.
- [19] Hou Wenjuan, Gao Jiangbo, Dai Erfu, et al. The runoff generation simulation and its spatial variation analysis in Sanchahe basin as the south source of Wujiang. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1268-1282. [侯文娟, 高江波, 戴尔阜, 等. 基于SWAT模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异. *地理学报*, 2018, 73(7): 1268-1282.]
- [20] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [21] Tao Haiyan, Pan Zhongzhe, Pan Maolin, et al. Mixing spatial-temporal transmission patterns of metropolis dengue fever: A case study of Guangzhou, China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1653-1662. [陶海燕, 潘中哲, 潘茂林, 等. 广州大都市登革热时空传播混合模式. *地理学报*, 2016, 71(9): 1653-1662.]
- [22] Wang Shaojian, Wang Yang, Lin Xueqin, et al. Spatial differentiation patterns and influencing mechanism of housing prices in China: Based on data of 2872 counties. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(8): 1329-1342. [王少剑, 王洋, 蔺雪芹, 等. 中国县域住宅价格的空间差异特征与影响机制. *地理学报*, 2016, 71(8): 1329-1342.]
- [23] Lou C R, Liu H Y, Li Y F, et al. Socioeconomic drivers of PM<sub>2.5</sub> in the accumulation phase of air pollution episodes in the Yangtze River Delta of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13: 1-19.
- [24] Liang P, Yang X P. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors. *Catena*, 2016, 145: 321-333.
- [25] Turner M G, Donato D C, Romme W H. Consequences of spatial heterogeneity for ecosystem services in changing forest landscapes: Priorities for future research. *Landscape Ecology*, 2013, 28: 1081-1097.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Zhang Rongzu, Zheng Du, Yang Qingye, et al. *Physical Geography of Hengduan Mountain Area*. Beijing: China Science Press, 1997. [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.]
- [29] Liu J, Zhang Z, Xu X, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [30] Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 707-724. [周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 707-724.]
- [31] Budyko M I. *Climate and Life*. San Diego: Academic Press, 1974.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [35] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [36] Mcgarigal K, Marks B J. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 1995: 122.
- [37] Delphin S, Escobedo F J, Abd-Elrahman A, et al. Urbanization as a land use change driver of forest ecosystem services. *Land Use Policy*, 2016, 54: 188-199.
- [38] Sun G, Caldwell P, Noormets A, et al. Upscaling key ecosystem functions across the conterminous United States by a water-centric ecosystem model. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2011, 116: 1-16.
- [39] Lu Dadao, Chen Mingxing. Several viewpoints on the background of compiling the "National New Urbanization Planning (2014-2020)". *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 179-185. [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.]

- [40] Liu Yansui. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 637-650.[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.]
- [41] Su S, Xiao R, Jiang Z L, et al. Characterizing landscape pattern and ecosystem service value changes for urbanization impacts at an eco-regional scale. *Applied Geography*, 2012, 34: 295-305.
- [42] Jordan G, van Rompaey A, Szilassi P, et al. Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton basin (Hungary). *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 108: 119-133.

## Spatial heterogeneity and driving mechanisms of water yield service in the Hengduan Mountain region

DAI Erfu<sup>1,2</sup>, WANG Yahui<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:** Ecosystem services, which include water yield services, have been incorporated into decision processes of regional land use planning and sustainable development. Spatial pattern characteristics and identification of factors that influence water yield are the basis for decision making. However, there are limited studies on the driving mechanisms that affect the spatial heterogeneity of ecosystem services. In this study, we used the Hengduan Mountain region in Southwest China, with obvious spatial heterogeneity, as the research site. The water yield module in the InVEST software was used to simulate the spatial distribution of water yield. Also, quantitative attribution analysis was conducted for various geomorphologic and climatic zones in the Hengduan Mountain region by using the geographical detector method. Influencing factors, such as climate, topography, soil, vegetation type, and land use type and pattern, were taken into consideration for this analysis. Four key findings were obtained. First, water yield spatial heterogeneity are influenced most by climate-related factors, among which precipitation and evapotranspiration are the dominant factors. Second, the relative importance of each impact factor to the water yield heterogeneity differs significantly by geomorphologic and climatic zones. In flat areas, the influence of evapotranspiration is higher than that of precipitation. As relief increases, the importance of precipitation increases and eventually, it becomes the most important factor. Evapotranspiration is the most important factor in a plateau climatic zone, while in the mid-subtropical zone, precipitation is the main controlling factor. Third, land use type is also an important driving force in flat areas. Thus, more attention should be paid to urbanization and land use planning, which involves land use changes, to mitigate the impact on water yield spatial pattern. The fourth finding was that a risk detector showed that Primarosol and Anthropogenic soil areas, shrub areas, and areas with slopes  $<5^\circ$  and  $25^\circ$ - $35^\circ$  should be recognized as water yield important zones, while the corresponding elevation values are different in different geomorphologic and climatic zones. Therefore, the spatial heterogeneity and influencing factors in different zones should be fully considered in planning the maintenance and protection of water supply services in the Hengduan Mountain region.

**Keywords:** water yield service; InVEST software; geographical detector; attribution analysis; the Hengduan Mountain region