

# 基于 InVEST 模型的甬江流域水源供给 功能时空变化特征

杨昀则<sup>1</sup>, 田鹏<sup>2</sup>, 张海涛<sup>2</sup>, 沈杏雯<sup>2</sup>, 曹罗丹<sup>2</sup>, 李加林<sup>2,3</sup>

(1. 宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 地理科学与旅游文化学院, 浙江 宁波 315211; 3. 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 甬江流域是浙江七大水系之一, 研究其流域水源供给生态系统服务对于加快浙东地区生态文明建设、促进区域高质量发展具有重要意义。基于甬江流域三期土地利用、气象、土壤等数据, 估算了流域不同时期的水源供给能力及分析了产水量的地形梯度效应。结果表明: 甬江流域土地利用类型以农田、林地为主, 建设用地趋于大幅扩张, 其他地类面积趋于缩减。土地利用类型间转换剧烈; 流域年平均产水总量约为  $3.069 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 产水量呈下降趋势。甬江流域产水量以中上游产水量较高, 如姚江、鄞江和剡溪江流域, 且农田、林地对流域产水量贡献度较高; 甬江流域地形位指数集中分布在第1等级, 且产水量地形梯度效应较为显著。

**关键词:** 水源供给; 产水量时空变化; 地形位指数; InVEST 模型; 甬江流域

中图分类号: TV211.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)05-0107-11

## Spatiotemporal variation characteristics of water supply function of Yongjiang River Basin based on InVEST Model

YANG Yunze<sup>1</sup>, TIAN Peng<sup>2</sup>, ZHANG Haitao<sup>2</sup>, SHEN Xingwen<sup>2</sup>, CAO Luodan<sup>2</sup>, LI Jialin<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Faculty of Geography Science and Tourism Culture, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Ningbo University Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** As one of the seven major river systems in Zhejiang, the Yongjiang River Basin plays an important role in the construction of ecological civilization and regional high-quality development in eastern Zhejiang. Based on three sets of land use, meteorology and soil data of the Yongjiang River Basin, the water supply capacity of different periods was estimated, and the topographic gradient effect of water yield was analyzed. The results showed that the land use types in the Yongjiang River Basin were mainly farmland and forest. The construction land expanded significantly, whereas the area of other land types decreased. The conversion between different land use types was frequent. The average total water yield in the basin was about  $3.069 \times 10^8 \text{ m}^3$ , showing a downward trend. The water yield in the upper and middle reaches of the Yongjiang River Basin was relatively high, such as the Yaojiang River Sub-basin, Yinjiang River Sub-basin and Shanxijiang River Sub-basin, and the contribution of farmland and forest to the water yield of the basin was relatively high. The topographic index of the Yongjiang River Basin was mainly distributed in the first level, and the topographic gradient effect of water yield was significant.

**Key words:** water supply; spatiotemporal variation of water yield; topographic index; InVEST model; Yongjiang River Basin

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2021-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976209); 浙江省自然科学基金项目(LQ20D010006)

作者简介: 杨昀则(1996-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 研究方向为水资源管理。

通讯作者: 李加林(1973-), 男, 浙江台州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为海岸带资源环境管理。

## 1 研究背景

生态系统服务联系着人类社会的基本福祉,人类通过利用自然生态系统直接或者间接提供的各种服务来满足自身对生产、生活、文化等方面的需求,从而推动人类社会的长期发展和时代进步<sup>[1-2]</sup>。在千年生态系统评估项目的推动下,区域生态系统服务评价及对人类社会的影响也成为当前学术界的研究热点<sup>[3]</sup>。水源供给是生态系统服务中重要的一环,对区域生物多样性保持、氮磷循环、生态环境质量提高、社会的可持续发展等有重要意义<sup>[4]</sup>。进入 21 世纪以来,伴随着人口激增,社会经济水平跃升及城市扩张,人类对自然资源过度开发利用,将部分农田、林地、草地、水域不断开发和转变为建设用地,使得原有生态用地的面积巨幅减少。此外工业化和城市化的快速推进逐渐削弱着区域各地类的水源涵养功能,引起了区域植被覆盖减少、土壤沙化、水质恶化、生态系统功能衰退等环境危机<sup>[5-7]</sup>。开展区域水源供给服务评价,尤其是以流域为完整的评价单元,更有利于全面了解流域产水量空间变化,为流域水源保护、生态治理提供相应的理论与实践指导。

目前国内外学术界对流域水源供给模块已开展较多的实践研究,集中在流域水源供给服务的时空变化及驱动机制分析<sup>[8]</sup>。由于水的流动性强,对流域生态系统水源供给服务功能的定量化和可视化评价也是当前相关研究的重点。流域水源供给服务评估主要借助 SWAT、TerrainLab 和 InVEST 模型,而 InVEST 模型以其模型输入参数较少、数据导入要求相对较低等优势在世界范围内得到了广泛应用,如 Trisurat 等<sup>[9]</sup>应用该模型对泰国的 Thadee 流域进行了水源供给评估、Li 等<sup>[10]</sup>借助 InVEST 模型评估了快速兴起的旅游业对云南洱海产水量的影响。国内引入 InVEST 模型虽较晚,但发展迅速,广泛应用于区域生态系统服务评价中,如产水量、土壤保持、碳储量、氮输出等生态系统服务功能类型<sup>[11-13]</sup>,其中产水量服务更是被广泛应用于流域、行政区、生态保护区、干旱与半干旱生态环境脆弱区等不同区域尺度<sup>[14-15]</sup>。当前以流域作为完整水源供给评价单元的研究较多,集中在长江流域和黄河流域及其支流、内陆干旱半干旱区的石羊河等<sup>[16-18]</sup>,对东南沿海发达地区的流域研究较少。而在社会经济发达的东南沿海区域,虽受季风气候影响降水丰富,但工业化和城市化发展使其对水资源的需求量巨大,流域水源供给能力的研究对于促进区域社会经济可持续发展有着重要意义。甬江由奉化江

和姚江汇集而成,对宁波市社会经济发展、人民生活起到重要辅助作用,更是被誉为宁波的“母亲河”,但在宁波市快速城镇化和工业化的影响下,流域土地利用变化迅速,流域产水量下降,生态环境也受到较大外在干扰和威胁。故本文以我国东南沿海发达地区的甬江流域作为研究区,基于 1980-2018 年三期土地利用数据、气象数据、土壤数据等,分析区域土地利用覆被变化,运用 InVEST 模型评估了流域各年份的水源供给能力,分析不同流域和土地利用类型的产水量时空变化,并以地形位指数分析流域产水量的地形梯度效应,以期丰富流域水源供给研究内容,并为宁波市的流域生态保护治理、社会经济高质量发展提供理论与实践参考。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

甬江流域位于 29°24'N ~ 30°49'N, 120°49'E ~ 120°56'E 之间,位于浙江省东部沿海,地处浙江宁绍冲积平原东端(图 1)。甬江流域自西南向东北流经外游山汇入东海,其中奉化江和姚江是流域最大的两条支流。甬江流域面积约 361 km<sup>2</sup>,受季风气候影响,即夏季在副热带高压、气团、台风等作用下,雨量丰富;冬季则受西风带气流控制。境内雨量空间分布呈现南部多于北部,且由沿海向内陆递增的特征。甬江流域主要位于宁波市,流域人口约 468.8 万人,平均人口密度为 710 人/km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。随着社会经济水平的跃升,土地利用变化剧烈且强度提升,流域水源供给能力和水质均受到较大威胁。

### 2.2 数据来源

文章收集了 1980-2018 年甬江流域气象数据、土地利用数据、DEM 数据、土壤数据及浙江省行政边界数据等,其中气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),采用日值数据集,主要包括气温、降水等。土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),按照前人研究及研究区需要<sup>[19]</sup>,将土地利用划分为 12 种地类,包括未利用地、城镇用地、旱地、农田、林地、草地、湖泊、其他建设用地、水库坑塘、河流、农村居民点、潮滩。DEM 数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),包括甬江流域 4 幅 30 m 的 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据;土壤数据来自世界土壤属性数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD);行政边界数据来自全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn/>)。

此外,文中涉及的社会经济数据主要来自浙江省和宁波市统计年鉴。流域数据处理上,气象数据主要通过 ArcGIS 软件的地统计模块进行插值处理,其中潜在蒸散量通过 Penman - Monteith 公式计算得到并进行空间插值<sup>[13]</sup>;DEM 数据主要利用 ArcGIS 软

件的水文模块处理,土壤数据则利用 ArcGIS 软件的图层连接和裁剪处理。水源供给模块的参数表可见参考文献[13]、[14]。所有栅格图层统一分辨率为 30 m,投影为 WGS1984 - UTM。水源供给模型参数空间化如图 2 所示。

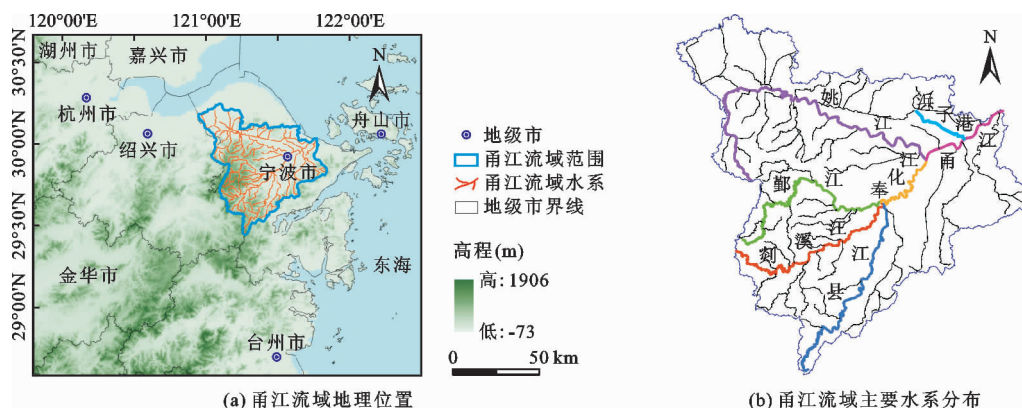


图1 研究区概况

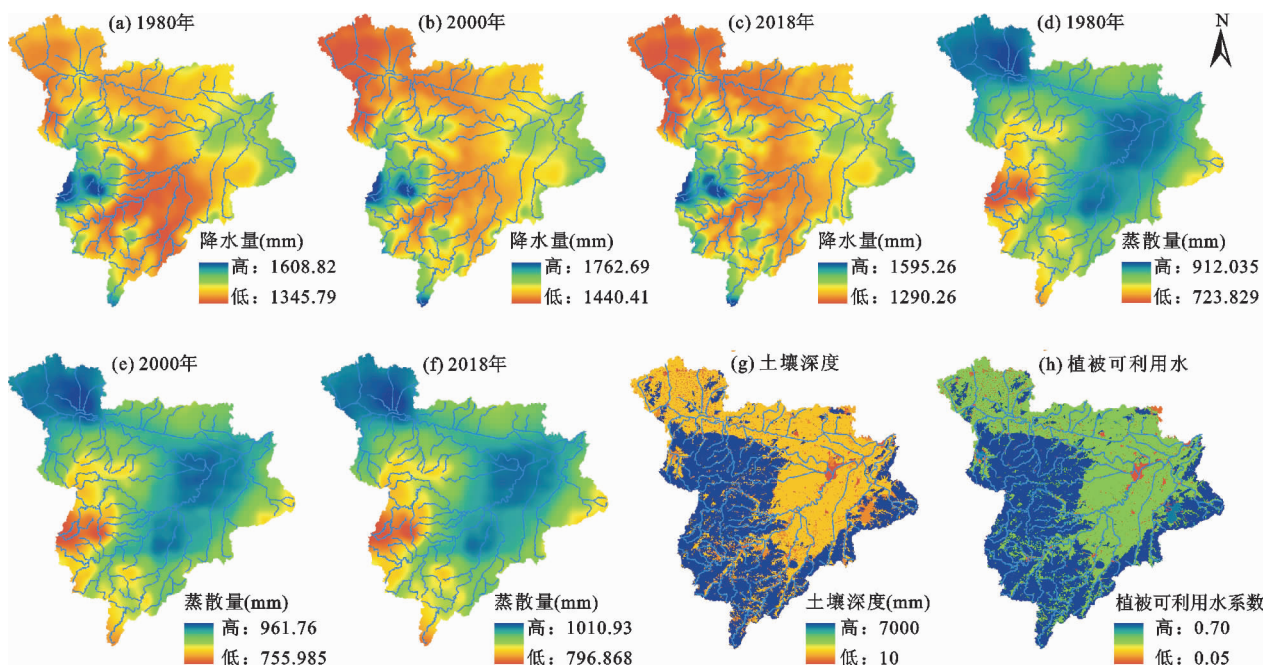


图2 水源供给模型参数空间化

## 2.3 研究方法

**2.3.1 水源供给服务** 水源供给服务主要基于 InVEST 模型中的产水模块,即在某特定时间内单位面积上的产水量,根据水量平衡的原理,区域水源供给量为单位面积上得到的降水量扣除实际蒸散发消失的水量<sup>[20-22]</sup>。计算各栅格像元下的产水量,主要公式为:

$$Y_{x,j} = (1 - \frac{AET_{x,j}}{P_x}) \cdot P_x \quad (1)$$

式中:  $Y_{x,j}$  为  $j$  类土地利用类型栅格  $x$  的产水量, mm;

$P_x$  为不同栅格像元  $x$  上的年均降水值, mm;  $AET_{x,j}$  为区域  $j$  地类栅格像元  $x$  的年均蒸散发量, mm。鉴于该方法已较为成熟,其指数的详细说明和计算公式见参考文献[11]、[22]。

**2.3.2 地形梯度效应** 区域地形因素对土地利用类型的影响主要是通过高程与坡度的相互作用影响其形成、发育条件,单一的地形因素如高程或坡度难以反映该种综合影响,故选取地形位( $T$ )指数来全面反映区域地形地势条件。 $T$  指数表征着区域地形的高程与坡度信息,反映了区域地形梯度,以此来分析不同地形位下

的产水量时空变化特征<sup>[23]</sup>。其公式如下:

$$T = \lg \left[ \left( \frac{E}{\bar{E}} \right) \cdot \left( \frac{S}{\bar{S}} \right) + 1 \right] \quad (2)$$

式中:  $E$  和  $\bar{E}$  为区域某点位的高程与整个区域的平均高程, m;  $S$  和  $\bar{S}$  为区域某点位的坡度与整个区域的平均坡度。若某点位的高程和坡度值较高, 则该点的  $T$  指数也较高, 反之亦然<sup>[23]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用/覆被变化分析

研究区内农田、林地所占面积及比例最大, 其次是旱地、农村居民点、城镇用地、草地、水库坑塘、河流, 而潮滩、湖泊、其他建设用地和未利用地面积较少, 1980–2018 年甬江流域土地利用类型及变化特征如图 3 和表 1 所示。分析图 3 和表 1 可知, 1980–

2018 年研究区内的农田、林地和草地面积均呈现不同程度的下降趋势, 其中农田和草地面积分别缩减了 53 707.04 hm<sup>2</sup> 和 1 521.49 hm<sup>2</sup>, 减幅分别达到了 30.85 % 和 38.61 %, 表明甬江流域在城市化的进程中占用了大量的农田和草地。1980–2018 年城镇用地和农村居民点面积迅速增长, 面积分别为 28 688.13 hm<sup>2</sup> 和 18 076.20 hm<sup>2</sup>, 占比增加了 507.19 % 和 210.91 %, 反映了在将近 40 年内宁波市城镇用地得到了快速发展, 不断向外扩张。另外, 1980–2018 年潮滩面积下降幅度较大, 面积由 1980 年的 1 892.12 hm<sup>2</sup> 缩减到 2018 年的 218.89 hm<sup>2</sup>, 降幅达到了 88.43 %, 大于草地和农田的下降幅度。潮滩面积的大幅缩减, 表明近 40 年以来甬江流域入海侧土地利用强度较大, 城市化进程不断加快且向潮滩扩张, 同时港口的建设、围垦等活动加剧了潮滩面积的减少。

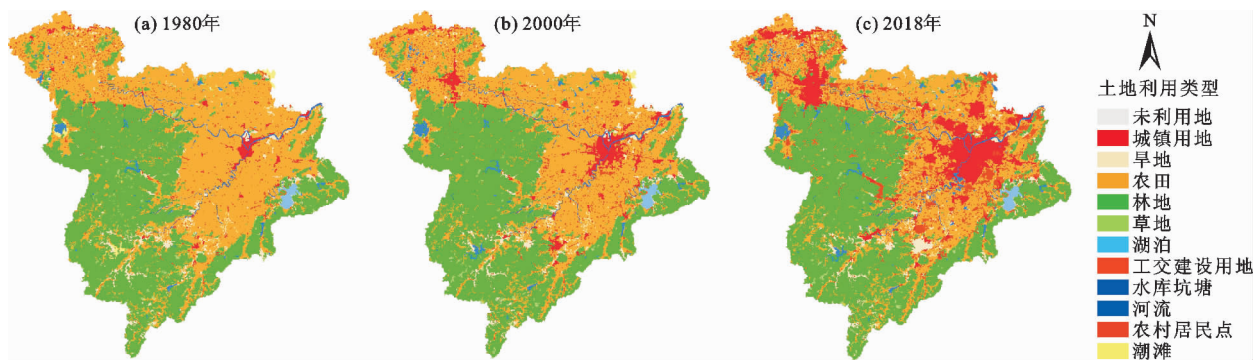


图 3 1980–2018 年甬江流域土地利用类型

表 1 甬江流域土地利用面积变化特征

| 土地利用类型 | 1980 年              |        | 2000 年              |        | 2018 年              |        | 1980–2018 年变化值      |         |
|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|---------|
|        | 面积/ hm <sup>2</sup> | 比例/%   | 面积/ hm <sup>2</sup> | 比例/%   | 面积/ hm <sup>2</sup> | 比例/%   | 面积/ hm <sup>2</sup> | 比例/%    |
| 未利用地   | 39.69               | 0.01   | 112.59              | 0.03   | 113.13              | 0.03   | 73.44               | 185.03  |
| 城镇用地   | 5656.30             | 1.49   | 13690.56            | 3.61   | 34344.43            | 9.05   | 28688.13            | 507.19  |
| 旱地     | 11820.30            | 3.11   | 10903.18            | 2.87   | 10991.02            | 2.90   | -829.28             | -7.02   |
| 农田     | 174091.12           | 45.88  | 158009.46           | 41.64  | 120384.08           | 31.72  | -53707.04           | -30.85  |
| 林地     | 164772.44           | 43.42  | 167431.38           | 44.12  | 164325.75           | 43.30  | -446.68             | -0.27   |
| 草地     | 3940.85             | 1.04   | 2286.87             | 0.60   | 2419.36             | 0.64   | -1521.49            | -38.61  |
| 湖泊     | 1783.58             | 0.47   | 1783.13             | 0.47   | 1783.40             | 0.47   | -0.18               | -0.01   |
| 其他建设用地 | 584.57              | 0.15   | 1149.06             | 0.30   | 8731.69             | 2.30   | 8147.12             | 1393.70 |
| 水库坑塘   | 3185.64             | 0.84   | 4844.84             | 1.28   | 6405.75             | 1.69   | 3220.11             | 101.08  |
| 河流     | 3146.04             | 0.83   | 3141.36             | 0.83   | 3118.95             | 0.82   | -27.09              | -0.86   |
| 农村居民点  | 8570.58             | 2.26   | 15150.40            | 3.99   | 26646.78            | 7.02   | 18076.20            | 210.91  |
| 潮滩     | 1892.12             | 0.50   | 980.40              | 0.26   | 218.89              | 0.06   | -1673.24            | -88.43  |
| 总计     | 379483.24           | 100.00 | 379483.24           | 100.00 | 379483.24           | 100.00 |                     |         |

基于 ArcGIS10.3 的空间分析工具得到甬江流域 1980–2018 年土地利用转移图件,以此分析不同年份间各地类的转移方向和转移面积,鉴于各年份间转移类型较多,故选取了转移面积大于  $100 \text{ hm}^2$  的转移地类进行空间展示和分析,得出的 1980–2018 年主要土地利用类型转换空间分布如图 4 所示。从图 4 总体上看,1980–2018 年甬江流域土地利用类型转移复杂且剧烈,转移类型多达 28 种,集中分布在流域的中东部和西北部,即以宁波和余姚为核心。具体上看,1980–2000 年的主要转移类型达到了 15 种,其中农田→城镇用地和农田→农村居民点两个转移类型面积最大,转换了  $7\,544.28$ 、 $6\,183.99 \text{ hm}^2$ ,占农田向外转移面积的 44.40% 和 36.39%,这也表明甬江流域受人类活动影响剧烈,在快速城镇化背景下城镇用地、农村居民点趋于向农田扩张。此外草地→林地、农田→林地、林地→草地这三种转移类型的转换面积均大于  $1\,000 \text{ hm}^2$ ,林地向外转移类型也较多,如林地→农村居民点、林地→旱地、林地→工交建设用地。2000–2018 年的土地利用主要转移类型达到了 31 种,其中农田的转移面积最大且转换类型最多。如农田→工交建设用地面积最大,达到了  $5\,440.024 \text{ hm}^2$ ,占农田向外转移面积的 13%,这表明了以工矿、交通等为主的人类活动对甬江流域影响程度较大,但相较之前的扩张

速度有所放缓,也反映了人们意识到保护耕地的重要性,开始放缓建设用地的扩张速度。其次林地转移类型较多,主要集中在林地→工交建设用地、林地→农田、林地→农村居民点,分别转换了  $1\,681.69$ 、 $1\,574.41$ 、 $1\,251.58 \text{ hm}^2$ ,占林地向外转移面积的 29.78%、27.88%、22.16%。同时,也存在部分的城镇用地和农村居民点转换成了农田,转换面积分别达到  $839.63$ 、 $162.18 \text{ hm}^2$ ,这表明了当前对耕地资源的保护更为重视。在转换类型中,还包括部分旱地转为了农田和林地,城镇用地、农村居民点、工交建设用地转为了林地和农田,表明了人们越来越意识到保护农田和林地的重要性。综上,甬江流域土地利用类型转移空间分布特征突出反映了城镇化的扩张,其中建设用地主要向农田和林地扩展,但随着城市化进程的放缓及生态文明建设的加快,建设用地也开始向林地、草地、水域等生态用地转移,如退耕还林还草、生态工程建设、流域生态修复等措施的实施。

### 3.2 水源供给服务功能评估

3.2.1 总体变化特征 通过 ArcGIS10.3 和 InVEST 模型得到甬江流域 1980–2018 年产水量空间分布(见图 5),并利用栅格计算器将图层相减得到不同时段的水量变化量空间分布(见图 6),以此分析甬江流域水源供给的空间分布、空间差异和变化特征。

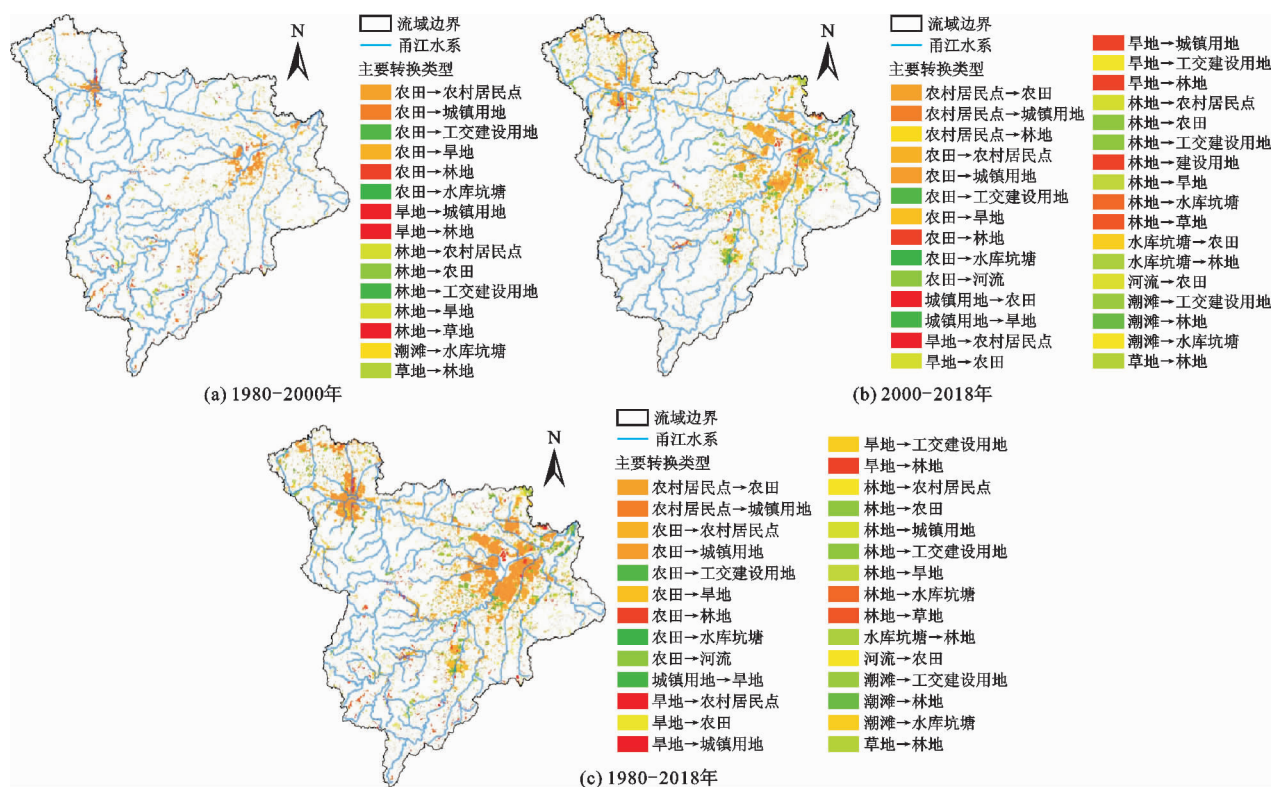


图4 1980–2018年主要土地利用类型转换空间分布

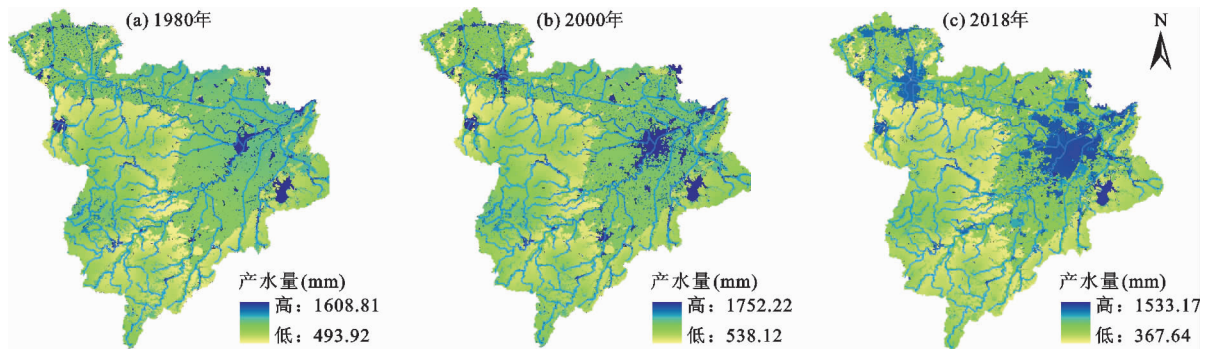


图5 1980-2018年甬江流域产水量空间分布

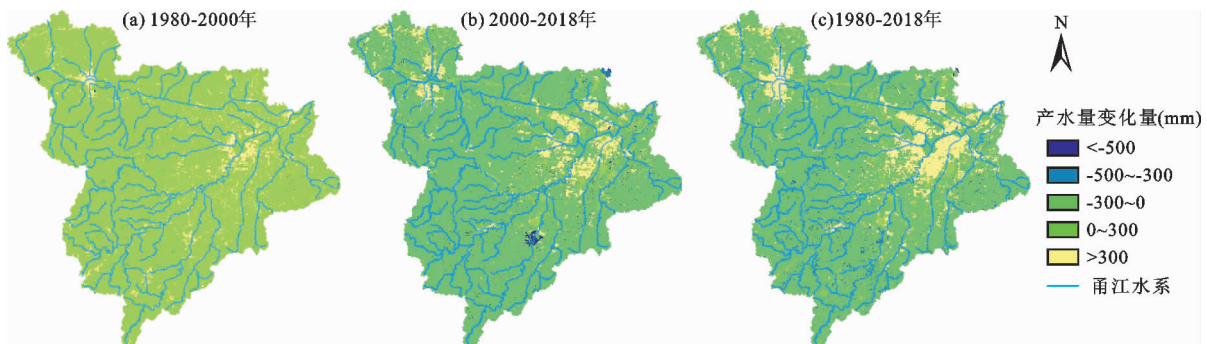


图6 1980-2018年甬江流域不同时段产水量变化量空间分布

1980、2000、2018年甬江流域总产水量分别为  $2.9887 \times 10^8$ 、 $3.3741 \times 10^8$ 、 $2.8449 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 该3个年份基于栅格像元的平均产水量分别为 786.72、888.15、748.87 mm, 整体上处于下降趋势, 该结果与包玉斌等<sup>[22]</sup>对黄土高原水源涵养的研究结果类似, 研究期间甬江流域平均产水量各年份间呈现先上升后减小的趋势, 1980-2018年平均产水量下降了 34 mm。

1980年甬江流域基于栅格像元上的产水量范围为 493.92 ~ 1 608.81 mm, 产水量高值区集中在流域中下游, 尤其是姚江流域、鄞江和奉化江流域交汇处。此外东钱湖以及一些湖泊也是产水量的高值区。产水量低值区则集中在地势起伏较大的山脊处, 在地形较大起伏的影响下, 土壤浅薄, 且存在水土流失现象。2000年, 甬江流域基于栅格像元上的产水量范围为 538.12 ~ 1 752.22 mm, 产水量最大值和最小值分别增大了 143.41、44.20 mm, 高值区在原先基础上向外扩张, 区域建设用地的扩展增加了区域的不透水面面积, 使得降水下渗受阻, 也增加了建设地上的产水量。2018年, 甬江流域基于栅格像元上的产水量范围为 367.64 ~ 1 533.17 mm, 产水量趋于下降, 但高值区范围快速扩大, 呈现以中东部的宁波市区和西北部的余姚和慈溪市为中心的高值区, 以及湖泊水域高值区零星分布。从产水量

各年份间的总体变化上看, 1980-2018年甬江流域产水变化量集中在  $-299.99 \sim 0 \text{ mm}$ , 表明流域产水量下降。各年份变化上, 1980-2000年产水量变化呈上升趋势, 产水量上升幅度集中在  $0 \sim 300 \text{ mm}$ , 增大幅度大于  $300 \text{ mm}$  的区域集中在产水量的高值区, 即宁波市区与余姚、慈溪市附近。2000-2018年流域产水量以下降趋势为主, 即产水量变化以  $-299.99 \sim 0 \text{ mm}$  为主导, 增大幅度大于  $300 \text{ mm}$  的范围继续扩张, 而产水量变化在小于  $500 \text{ mm}$  的范围也小幅扩大。

**3.2.2 不同流域的水源供给服务特征** 基于甬江流域 30 m DEM 数据, 以 ArcGIS 的水文模块分析得到流域 33 个不同大小的子流域, 统计得到各流域的栅格像元平均产水量和总产水量大小, 以及栅格单元不同平均产水量和不同总产水量的子流域个数变化, 其结果分别见图 7、8 和表 2。

综合图 7、8 和表 2 来看, 1980-2018年甬江流域栅格平均产水量较多地集中在东部和西北部, 且呈现先增大后减小的趋势(图 7)。1980年各流域栅格平均产水量主要集中在  $700 \sim 900 \text{ mm}$  之间, 流域数量达到了 23 个, 而  $900 \sim 1 000 \text{ mm}$  的流域有 3 个, 大于  $1 000 \text{ mm}$  的流域仅有 1 个。2000年各流域栅格平均产水量主要集中在  $800 \sim 1 000 \text{ mm}$  之间, 数量达到了 22 个, 相比于 1980 年, 甬江流域栅格平均产水量呈增

大趋势,平均产水量小于 700 mm 的子流域从 1980 年的 6 个减少到了 2000 年的 0 个,平均产水量为 900 ~ 1 000 mm 的子流域从 1980 年的 3 个增加到了 2000 年的 11 个,平均产水量大于 1 000 mm 的子流域从 1980 年的 1 个增加到了 2000 年的 4 个,很好地反映了从 1980 - 2000 年各子流域的产水量总体上呈现增大趋势。2018 年平均产水量小于 700 mm 的子流域数量达到了 11 个,平均产水量为 700 ~ 800 mm 的子流域数量达到了 13 个,平均产水量在 900 ~ 1 000 mm 的子流域由 2000 年的 11 个减少到了 2018 年的 1 个,这说明了流域的产水量明显减小且呈减小趋势的子流域数量多。

1980 - 2018 年甬江流域总产水量也呈现先增大

后减小的趋势,产水量大的区域主要集中在流域中西部和东南部,即大多处于流域的中上游,如姚江流域、鄞江流域、剡溪江流域、县江流域等(图 8)。1980 年流域总产水量小于  $4\,000 \times 10^4\text{ m}^3$  的子流域为 13 个,总产水量为  $10\,000 \times 10^4 \sim 20\,500 \times 10^4\text{ m}^3$  的子流域有 10 个。2000 年流域总产水量小于  $4\,000 \times 10^4\text{ m}^3$  的子流域由 1980 年的 13 个减少到了 9 个,总产水量大于  $20\,500 \times 10^4\text{ m}^3$  的子流域由 1980 年的 2 个增加到了 4 个,表明了相较于 1980 年的流域总产水量,2000 年的流域总产水量总体呈现增大的趋势。2018 年总产水量小于  $4\,000 \times 10^4\text{ m}^3$  的子流域由 2000 年的 9 个增加到了 13 个,总产水量大于  $20\,500 \times 10^4\text{ m}^3$  的子流域由 2000 年的 4 个减少到了 2 个。

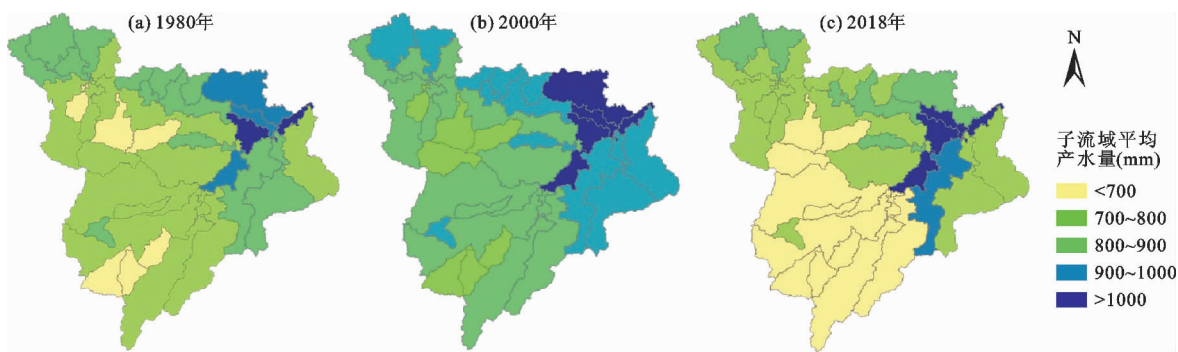


图 7 1980 - 2018 年甬江流域各子流域的栅格像元平均产水量分布

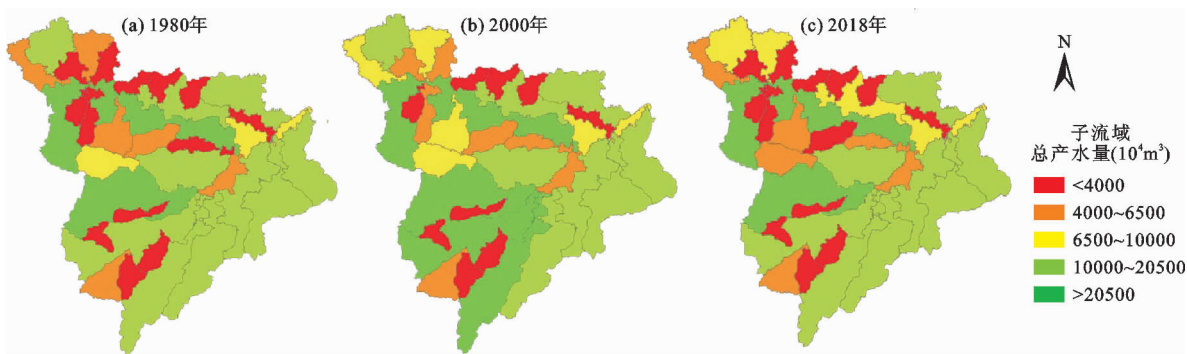


图 8 1980 - 2018 年甬江流域各子流域总产水量分布

表 2 1980 - 2018 年甬江流域栅格单元不同平均产水量和不同总产水量的子流域个数变化

| 栅格像元平均产水量/mm | 1980 年 | 2000 年 | 2018 年 | 流域总产水量/ $10^4\text{ m}^3$ | 1980 年 | 2000 年 | 2018 年 |
|--------------|--------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|--------|
| <700         | 6      | 0      | 11     | <4000                     | 13     | 9      | 13     |
| 700 ~ 800    | 11     | 7      | 13     | 4000 ~ 6500               | 6      | 7      | 6      |
| 800 ~ 900    | 12     | 11     | 5      | 6500 ~ 10000              | 2      | 5      | 4      |
| 900 ~ 1000   | 3      | 11     | 1      | 10000 ~ 20500             | 10     | 8      | 8      |
| >1000        | 1      | 4      | 3      | >20500                    | 2      | 4      | 2      |

甬江流域基于栅格像元下平均产水量处于前 3 位的子流域分别为甬江流域(1 121.04 mm)、奉化

江流域(1 077.25 mm)、浜子港流域(979.12 mm),从总产水量来看,前 3 位的子流域分别为姚江流域

( $31\,993.73 \times 10^4 \text{ m}^3$ )、鄞江流域( $23\,621.52 \times 10^4 \text{ m}^3$ )、剡溪江流域( $20\,816.29 \times 10^4 \text{ m}^3$ ),这些子流域总产水量均大于  $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,是甬江流域的主要组成部分,其水系发达,流域面积较广,产水量较高。

3.2.3 不同土地利用类型的水源供给服务特征统计 1980–2018 年甬江流域不同土地利用类型的平均产水量及其变化值,其结果见表 3。

表 3 1980–2018 年甬江流域不同土地利用类型的平均产水量及其变化量  $10^4 \text{ m}^3$

| 土地利用类型 | 1980 年   | 2000 年   | 2018 年   | 1980–2018 年变化量 |
|--------|----------|----------|----------|----------------|
| 未利用地   | 5.62     | 12.86    | 10.63    | 5.01           |
| 城镇用地   | 760.79   | 1990.16  | 4326.38  | 3565.59        |
| 旱地     | 1058.78  | 1078.98  | 928.17   | -130.61        |
| 农田     | 14743.56 | 15206.48 | 10456.38 | -4287.18       |
| 林地     | 10469.49 | 12184.98 | 9030.60  | -1438.90       |
| 草地     | 353.15   | 182.77   | 150.01   | -203.14        |
| 湖泊     | 252.90   | 276.44   | 245.25   | -7.65          |
| 其他建设用地 | 72.74    | 152.21   | 992.96   | 920.22         |
| 水库坑塘   | 447.13   | 723.18   | 832.76   | 385.64         |
| 河流     | 447.13   | 481.60   | 415.76   | -31.37         |
| 农村居民点  | 978.44   | 1857.41  | 2828.86  | 1850.42        |
| 潮滩     | 264.94   | 147.40   | 26.36    | -238.58        |

由表 3 可见,整体上甬江流域农田、林地的平均产水量最大,且远大于其他地类,这也表明农田和林地对甬江流域水源供给能力的贡献突出,农田和林地作为甬江流域主要覆被类型,也发挥着自身水源供给的主导作用。1980–2018 年 12 种土地利用类型的平均产水量变化差异性显著,如城镇用地、其他建设用地、农村居民点的产水量为不断增大的趋势,变化量更是分别高达  $3\,565.59 \times 10^4$ 、 $920.22 \times 10^4$ 、 $1\,850.42 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2018 年农田、林地、潮滩、草地的产水量相比较于 1980 年减小明显,变化量分别为  $-4\,287.18 \times 10^4$ 、 $-1\,438.90 \times 10^4$ 、 $-238.58 \times 10^4$ 、 $-203.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

分时间段看,1980–2000 年 12 种土地利用类型的产水量大体上呈现增大趋势,城镇用地、农村居民点的流域产水量增长幅度分别达到了  $1\,229.37 \times 10^4$ 、 $878.97 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,仅有草地和潮滩的产水量呈减小趋势,分别减小了  $170.38 \times 10^4$ 、 $117.54 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2000–2018 年农田、林地土地利用类型的流域产水量减小明显。农田流域产水量从 2000 年的

$15\,206.48 \times 10^4 \text{ m}^3$  减小至 2018 年的  $10\,456.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,减少了  $4\,750.10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,林地流域产水量从 2000 年的  $12\,184.98 \times 10^4 \text{ m}^3$  减小至 2018 年的  $9\,030.60 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,减少了  $3\,154.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。城镇用地、其他建设用地、农村居民点土地利用类型的流域产水量显著增大。城镇用地从 2000 年的  $1\,990.16 \times 10^4 \text{ m}^3$  增大至 2018 年的  $4\,326.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,增加了  $2\,336.22 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其他建设用地从 2000 年的  $152.21 \times 10^4 \text{ m}^3$  增大至 2018 年的  $992.96 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,增加了  $840.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,农村居民点从 2000 年的  $1\,857.41 \times 10^4 \text{ m}^3$  增大至 2018 年的  $2\,828.86 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,增加了  $971.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,这也反映了甬江流域建设用地的大幅增长,增加了流域内的不透水面面积,导致水流下渗减弱,使得建设用地的产水量增加,而建设用地的扩展且对其他地类的占用,也导致了其他地类产水量的大幅减少,如林地面积的缩减导致产水量的快速减少,也表明了当前需要加强对林地、草地、水域等生态用地的保护,加强退耕还林还草、控制建设用地扩展速度等措施,提高其生态用地的产水量。

### 3.3 水源供给服务的地形梯度效应

在快速城镇化驱动下,甬江流域土地利用转移剧烈,而地面覆被的变化也不断改变着流域下垫面,从而影响产水量的空间分布。以甬江流域 DEM 数据处理得到区域高程和坡度数据,按照公式(2)利用软件 ArcGIS10.5 空间分析下的栅格计算器处理得到流域的地形位指数  $T$ ,借鉴前人的研究经验<sup>[23]</sup>,以自然断点法进行分级处理,分别为 1 级( $T < 0.23$ )、2 级( $T = 0.23 \sim 0.49$ )、3 级( $T = 0.49 \sim 0.75$ )、4 级( $T = 0.75 \sim 1.02$ )、5 级( $T = 1.02 \sim 1.64$ )。甬江流域地形位指数  $T$  分布情况如图 9 所示。

$T$  指数可以清晰地反映地形分布和地势走向状况。甬江流域地势呈现西高东低,由西南向东北方向倾斜,中东部地势平坦处为各流域冲积形成的宁绍平原,而西部地势起伏较大处为四明山脉。由图 9 可知,甬江流域  $T$  指数等级以 1 级为主导,面积占比达到 47.46%,4、5、3 级次之,面积占比分别为 17.52%、15.19%、11.32%,2 级地形位面积最小,面积占比仅为 8.51%。

利用 SPSS 软件分析甬江流域 33 个子流域的  $T$  指数与其平均产水量的相关性,1980、2000、2018 年两者的相关系数分别为 0.809、0.828、0.798,均大于 0.75,表明甬江流域的  $T$  指数与产水量的相关性较为显著。

统计 1980 – 2018 年甬江流域不同地形位下的平均产水量,结果见表 4。

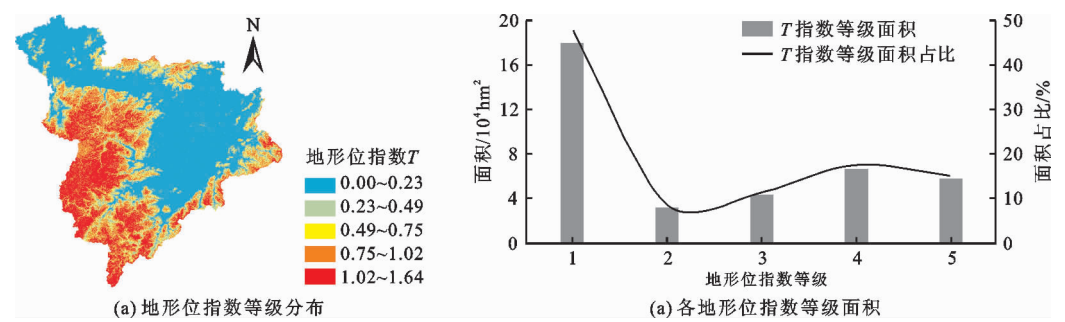


图 9 甬江流域地形位指数  $T$  分布情况

表 4 1980 – 2018 年甬江流域不同地形位下的平均产水量

| 地形位指数等级 | 栅格像元平均产水量/mm |        |        | 地形位等级平均产水量/ $10^4 \text{ m}^3$ |          |          | 1980 – 2018 年平均产水量变化量/ $10^4 \text{ m}^3$ |
|---------|--------------|--------|--------|--------------------------------|----------|----------|-------------------------------------------|
|         | 1980 年       | 2000 年 | 2018 年 | 1980 年                         | 2000 年   | 2018 年   |                                           |
| 1       | 880.37       | 997.57 | 908.29 | 15855.34                       | 17965.98 | 16358.06 | 502.73                                    |
| 2       | 754.99       | 839.30 | 675.51 | 2437.61                        | 2709.82  | 2180.99  | -256.62                                   |
| 3       | 685.39       | 761.95 | 582.67 | 2945.26                        | 3274.26  | 2503.85  | -441.41                                   |
| 4       | 676.53       | 760.62 | 571.67 | 4497.83                        | 5056.94  | 3800.70  | -697.13                                   |
| 5       | 714.52       | 814.86 | 620.13 | 4118.64                        | 4697.07  | 3574.61  | -544.04                                   |

由表 4 可知,1980 – 2000 年  $T$  指数等级的栅格像元平均产水量呈现先增大后减小的趋势。1980 年  $T$  指数等级 1 栅格像元平均产水量最大,达到 880.37 mm,  $T$  指数等级 4 栅格像元平均产水量最小,仅为 676.53 mm。2000 年  $T$  指数等级 1 栅格像元平均产水量较 1980 平均产水量增大了 117.20 mm,增幅最大。 $T$  指数第 2 等级虽面积占比较少,但栅格像元平均产水量较大,达到了 839.30 mm。 $T$  指数第 4 等级栅格像元平均产水量最小,为 760.62 mm。2018 年  $T$  指数等级 5 栅格像元平均产水量较 2000 年减小幅度最大,减小了 194.73 mm。其次是  $T$  指数等级 4 和 3,分别减小了 188.95 和 179.29 mm。从地形位等级上的平均产水量上看,1980 – 2018 年均以第 1 等级  $T$  指数的平均产水量值最大,均大于  $15\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,且远高于 2、3、4、5 地形位等级,第 1 等级  $T$  指数以耕地和建设用地为主导,而两地类的平均产水量较高,这也使得该等级地形位下的平均产水量值最高。而第 2 等级  $T$  指数下的平均产水量值较小,第 2、3、4、5 等级  $T$  指数地形位下的平均产水量随着地形位等级提升而趋于增大,这主要是由于随着海拔的提升,林地面积不断扩大,使得区域平均产水量增加。1990 – 2018 年变化量  $T$  指数等级 1 总体呈现正增长,变化量达到  $502.73 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其余  $T$  指数等级变化量均为负增长,其中第

4、5、3 等级变化量分别为  $-697.13 \times 10^4$ 、 $-544.04 \times 10^4$ 、 $-441.41 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

4 讨 论

基于甬江流域多期土地利用、气象、土壤等数据,本文对甬江流域的总产水量进行了定量评估,1980、2000、2018 年流域总产水量分别为  $2.9887 \times 10^8$ 、 $3.3741 \times 10^8$ 、 $2.8449 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,该结果与李文杰等<sup>[26]</sup>和余铭婧<sup>[27]</sup>对甬江流域产水量的研究成果相符,也表明 InVEST 模型在对流域进行水源供给评估工作中的适用性。甬江流域的水源供给量呈现先增大后减少的变化特征,该特征与何莎莎等<sup>[20]</sup>对太行山淇河流域研究的水源供给量整体特征保持一致。甬江流域以农田、林地对水源供给贡献量最大,该结果与李怡颖等<sup>[28]</sup>的研究结果相似。甬江流域内耕地多为平原地区,尤其是在流域中下游平原(地形位指数第 1 等级区域),受海洋湿润气流影响而降水丰富,从而使得耕地水源供给量充足<sup>[12]</sup>。此外,林地作为生态用地具有较强的水源涵养能力,其广泛分布于甬江流域中上游,水源供给量也较大。鉴于此,为提升流域水源供给能力,需要加强对流域内林地、农田资源的保护,促进建设用地向生态用地转换。本文还定量评估了甬江流域水源供给的时空变化特征,明确了区域水源供给的主要路径,对区域

水资源、土地利用资源保护和政策制定具有重要的理论与实践意义。

本文借助 InVEST 模型的 Water yield 模块对甬江流域水源供给进行了评估,虽然当前 InVEST 模型广泛应用于流域、不同行政区和保护区等生态系统服务功能的评估上,但众多研究也表明,需要对该模型输入的生物物理参数进行进一步的优化以提高其精度,故也需要增加对流域河流多站点的数据获取,以验证模型的准确性<sup>[17]</sup>。

## 5 结 论

本文基于 InVEST 模型测算了 1980—2018 年甬江流域的水源供给能力,分析了各子流域和土地利用类型下的产水量时空变化及流域产水量的地形梯度效应。主要结论如下:

(1) 甬江流域以农田和林地为主导,1980—2018 年,农田、林地、草地、潮滩面积减少,城镇用地和农村居民点面积快速增长。甬江流域土地利用类型转移复杂且剧烈,转移类型多达 28 种,集中分布在流域的中东部和西北部。转换类型以农田→城镇用地、农田→农村居民点、农田→工交建设用的地面积为最大。

(2) 甬江流域平均产水量在研究时段内呈现先增大后减小的趋势。产水量高值区主要集中于流域的中上游,如姚江流域、鄞江流域、剡溪江流域、县江流域等。甬江流域总产水量前 3 位的子流域分别为姚江流域( $31\,993.73 \times 10^4 \text{ m}^3$ )、鄞江流域( $23\,621.52 \times 10^4 \text{ m}^3$ )、剡溪江流域( $20\,816.29 \times 10^4 \text{ m}^3$ )。流域内农田、林地的平均产水量最大,其他地类较小。

(3) 甬江流域地势呈现西高东低,由西南向东北方向倾斜,地形位以 1 级为主,其面积占比达到 47.46%,4、5、3 级次之,2 级地形位面积最少。甬江流域产水量与地形位指数的相关性较为显著,相关系数均大于 0.75。栅格像元平均产水量呈现先增大后减少的趋势,以地形位第 1 等级最大,第 4 等级最小,而地形位区域的平均产水量以第 1 等级为主导,均大于  $15\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,且远大于其他等级,2、3、4、5 地形位下的平均产水量随着地形位等级的提升而趋于增大。

## 参考文献:

- [1] REN Linjing, LI Jie, LI Shuzhuo, et al. Does China's major payment for ecosystem services program meet the "gold criteria"? Targeting strategies of different decision-makers[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 122667.
- [2] HOU Ying, DING Shoukang, CHEN Weiping, et al. Ecosystem service potential, flow, demand and their spatial associations: A comparison of the nutrient retention service between a human-and a nature-dominated watershed[J]. Science of the Total Environment, 2020, 748: 141341.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being[M]. Washington: Island Press, 2005.
- [4] MARTIN N. Risk assessment of future climate and land use/land cover change impacts on water resources[J]. Hydrology, 2021, 8(1): 8010038.
- [5] 田 鹏,李加林,史小丽,等.浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2697—2706.
- [6] 曹叶琳,宋进喜,李明月,等.陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J].水土保持学报,2020,34(4):217—223.
- [7] 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[J].应用生态学报,2013,24(1):183—189.
- [8] 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.
- [9] TRISURAT Y, EAWPANICH P, KALLIOLA R. Integrating land use and climate change scenarios and models into assessment of forested watershed services in Southern Thailand[J]. Environmental Research, 2016, 147: 611—620.
- [10] LI Jinghui, BAI Yang, ALATALO J M. Impacts of rural tourism-driven land use change on ecosystems services provision in Erhai Lake Basin, China[J]. Ecosystem Services, 2020, 42: 101081.
- [11] 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.
- [12] 贾婉琳,吴赛男,陈 昂.基于 InVEST 模型的赤水河流域生态系统服务功能评估研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(4):313—320.
- [13] 郭丽洁,尹小君,苟贞珍,等.基于 InVEST 模型的阿克苏河流域产水量评估及环境因素影响研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2020,38(2):216—224.
- [14] 杨 洁,谢保鹏,张德昱.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.
- [15] 孙艳伟,李加林,马仁锋,等.于桥水库流域水源供给服务的空间分布格局[J].水资源与水工程学报,2015,26(6):1—6.
- [16] 赵雪雁,杜昱璇,李 花,等.黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J].自然资源学报,2021,36(1):131—147.

- [17] 曾建军,李元红,金彦兆,等. InVEST 模型在石羊河流域生态系统水源供给中的应用前景与方法[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(6):83-87.
- [18] 吕乐婷,任甜甜,孙才志,等. 1980-2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究[J]. 生态学报,2020,40(3):993-1003.
- [19] 周子靖,姜文达,史作琦,等. 东南沿海土地利用转型的生态服务价值研究——以甬江流域为例[J]. 水土保持通报,2020,40(2):308-316.
- [20] 何莎莎,叶露培,朱文博,等. 太行山淇河流域 2000-2015 年土壤侵蚀和水源供给变化研究[J]. 地理研究,2018,37(9):1775-1788.
- [21] 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, 569-570: 1418-1426.
- [22] 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.
- [23] 朱昌丽,张继飞,赵宇鸾,等. 青藏高原东缘典型流域生态系统服务的地形梯度效应——以岷江上游为例[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(10):1687-1699.
- [24] ZHOU Wenzuo, LIU Gaohuan, PAN Jianjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 3-12.
- [25] 龚诗涵,肖洋,郑华,等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报,2017,37(7):2455-2462.
- [26] 李文杰,邵学强. 甬江流域入海径流量研究[J]. 浙江水利科技,2007(3):53-55+59.
- [27] 余铭婧. 城镇化背景下水系特征及水文过程变化研究——以甬江流域鄞奉平原为例[D]. 南京:南京大学,2013.
- [28] 李怡颖,范继辉,廖莹. 基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J]. 草业科学,2020,37(7):1313-1324.

(上接第 106 页)

- [11] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):53-61.
- [12] 张彬鸿,李家科,李亚娇. 低影响开发(LID)透水铺装技术研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):137-144.
- [13] 唐双成,罗纨,贾忠华,等. 西安市雨水花园蓄渗雨水径流的试验研究[J]. 水土保持学报,2012,26(6):75-79+84.
- [14] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展,2019,30(1):45-55.
- [15] 石宝山,侯精明,李丙尧,等. 基于 Green-Ampt 和稳渗不同入渗模型下的城市内涝影响数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(5):115-123.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范:GB 50400—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [17] 孟莹莹,陈茂福,张书函. 植草沟滞蓄城市道路雨水的试验及模拟[J]. 水科学进展,2018,29(5):636-644.
- [18] 薛凯喜,赵宝云,胡艳香,等. 非饱和红壤土降雨入渗室内模拟试验[J]. 地球与环境,2016,44(3):382-389.
- [19] HSU S Y, HILPERT M. Incorporation of dynamic capillary pressure into the Green-Ampt model for infiltration [J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(2): 642-653.
- [20] 李毅,王全九,邵明安,等. Green-Ampt 入渗模型及其应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(2):225-230.
- [21] 张振华,潘英华,蔡焕杰,等. Green-Ampt 模型入渗率显式近似解研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2006,22(4):308-311.