

# 重庆龙溪河流域水生态系统服务时空 演变及对土地利用变化响应

张思颖, 陈荣蓉, 程 先

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 探究区域水生态系统服务时空变化状况及其与土地利用的关系, 有利于区域水生态环境保护 and 国土资源合理开发利用, 帮助决策者通过合理的土地利用方式提高区域生态系统服务能力, 平衡区域生态功能与农业生产功能。选择位于长江上游重要生态屏障的重庆市龙溪河流域作为研究对象, 利用 InVEST 模型, 对龙溪河流域近 20 年产水、水质净化、土壤保持服务等水生态系统服务的时空变化特征和其受不同土地利用类型的影响进行了研究。结果表明: (1) 近 20 年龙溪河流域水生态系统服务总体呈增强变好的趋势, 但存在一定的空间差异性。虽然产水与水源涵养服务在整个流域空间上相差不大, 但水质净化服务在流域林地密集区较场镇和工业集聚区强, 土壤保持服务在流域中部南北向水域、建设用地、农地集中区较流域东西两侧坡地强。(2) 不同土地利用类型对流域水生态系统服务贡献呈现较大差异性。产水服务由强到弱表现为耕地>林地>建设用地>草地>水域, 水源涵养能力表现为耕地>草地>水域>林地>建设用地, 水质净化服务表现为林地>草地>建设用地>耕地>水域, 土壤保持服务表现为水域>建设用地>耕地>林地>草地。(3) 为平衡供给与调节服务, 宜以乡镇为单元将龙溪河流域划分为生态修复区、农业生产区、城镇发展区, 并针对各分区采取相应生态措施。

**关键词:** 水生态系统服务; 产水量; 水质净化; 土壤侵蚀; InVEST 模型; 龙溪河流域

中图分类号: P964

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0173-11

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.023

## Spatiotemporal Changes of Water-related Ecosystem Services and the Responses to Land Use Changes of the Longxi River Basin, Chongqing

ZHANG Siying, CHEN Rongrong, CHENG Xian

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

**Abstract:** Exploring the spatial and temporal changes of regional aquatic ecosystem services and their relationship with land use is conducive to the protection of regional aquatic ecological environment and the rational development and utilization of land resources, and helps decision makers to improve the regional ecosystem service capabilities and balance the regional ecological functions and agricultural production functions through reasonable land use methods. Longxi River Basin (LRB) in Chongqing, an important ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River, was selected as the research object. The InVEST model was used to study the temporal and spatial variation characteristics of water ecosystem services such as water production, water purification and soil conservation services in the Longxi River Basin in recent 20 years and their effects on different land use types. The results showed that: (1) In the past 20 years, the water ecosystem services of the LRB in Chongqing were generally enhanced and improved, but there were some spatial differences. Although the water yield and water source conservation services of the whole basin had little difference, the forest-intensive area in basin of the water purification services was stronger than that of farm town and industrial agglomeration area. The soil conservation services in basin of water area, construction land and forest land in the central and north-south was stronger than the sloping land on the east and west sides of the basin. (2) Different land use types had different contributions to water ecosystem

收稿日期: 2023-01-03

资助项目: 中央高校基本科研业务费项目(SWU119037)

第一作者: 张思颖(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土地利用生态与国土整治研究。E-mail: zhangsiying\_swu@163.com

通信作者: 程先(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土地利用变化生态效应研究。E-mail: chengxian@swu.edu.cn

services. The order of the water yield services from strong to weak as follows: cultivated land > construction land > forest land > grassland > water area. The water conservation capacity from strong to weak as follows: cultivated land > grassland > water area > forest land > construction land. The water purification services from strong to weak as follows: forest land > grassland > construction land > cultivated land > water area. Soil conservation services from strong to weak as follows: water area > construction land > cultivated land > forest land > grassland. (3) In order to balance the supply and regulation services, it was appropriate to take township as a unit to divide the Longxi River Basin into ecological restoration area, agricultural production area and urban development area, and take corresponding ecological measures for each partition.

**Keywords:** water-related ecosystem services; water yield; water purification; soil erosion; InVEST model; Longxi River Basin

生态系统服务主要指生态过程中形成的供人们生存的自然环境及其效用,是人类生存和发展的基础<sup>[1-2]</sup>,是生态环境质量以及生态安全的重要表征<sup>[3-4]</sup>。生态系统的核心要素之一是水,水生态系统对于维持人类生产生活以及维持生态环境等都具有重要意义<sup>[5]</sup>,水生态系统服务则是指水生态系统与其生态过程所提供的直接产品或维持人的生产生活功能,以及其维持自然生态过程与区域生态环境条件的功能与效用<sup>[6-7]</sup>。水源涵养、水质净化、水土保持服务是水生态系统服务的重要内容<sup>[8]</sup>,对其展开研究,对实现区域水生态环境保护、合理进行水资源开发与利用有着重要的意义。

土地利用是人与自然相互作用的重要表现形式,是自然环境变化与发展的重要内容<sup>[9]</sup>。区域不同的土地利用组织方式必然造成区域景观格局的多样化,也引起土壤水分和养分、地表径流与侵蚀等生态过程的不同变化,给水生态系统服务带来了重要的影响<sup>[10]</sup>。基于水生态系统对人类可持续发展和生态系统稳定维持的重要性,近年来,土地利用对水生态系统服务的驱动作用也成为较多学者关注和研究的热点命题<sup>[11-13]</sup>。

目前,对于生态系统服务的研究已有较多成熟的模型,如 SoIVES、ARIES、InVEST 等<sup>[14]</sup>。其中,InVEST 模型因数据需求简单、模块众多,可实现生态系统服务量化与空间可视化等优势在生态领域被广为应用<sup>[15-16]</sup>,在水生态系统服务研究也不例外,刘菊等<sup>[17]</sup>运用 InVEST 的产水模块实现了水源涵养量的空间化评估,为研究区流域生态补偿等提供了依据;陈姗姗等<sup>[18]</sup>利用 InVEST 模型对商洛市土壤保持生态服务功能进行研究;刘宥延等<sup>[19]</sup>运用 InVEST 模型模拟了黄土高原丘陵水源涵养功能的空间变化特征为决策者提供决策依据。因此,基于 InVEST 模型能够较好实现水生态系统服务定量与可视化研究。

然而,梳理相关研究<sup>[12-13,20]</sup>发现,现有研究大多

围绕尺度较大的市县级行政区或较大流域开展研究,在小尺度上探究水生态系统服务受不同土地利用类型影响的相关研究较少。而位于长江上游素有“重庆粮仓”美誉的龙溪河流域,承担着保障重庆市生态与粮食安全的重要责任。在这一较小尺度的区域内,如何通过合理的土地利用管理提高其生态系统服务能力,平衡流域生态功能与农业生产功能,是一个亟待研究的重要问题。基于此,本文尝试基于乡镇级行政分区尺度与小流域概念细化处理空间分析单元,结合重要参数本土化的研究方法,以重庆市龙溪河流域为研究对象,选取 InVEST 模型的产水与水源涵养、水质净化、土壤保持服务,对龙溪河流域近 20 年(2000—2020 年)水生态系统服务时空变化特征及其受不同土地利用类型的影响进行探究,以期能为龙溪河流域水生态环境保护和国土资源空间合理开发利用提供科学依据,也为从小尺度探究小流域土地利用与水生态系统服务之间的关系提供新的研究思路及方法。

## 1 研究区概况

位于重庆东北的龙溪河(29°38′—30°53′N,106°49′—108°05′E)发源于重庆市梁平区境内的东山森林公园,属长江干流上游北岸的一级支流,其流域面积为 3 223.39 km<sup>2</sup>,涉及重庆梁平、垫江、长寿等 6 个区县的 60 个镇(街)(图 1、图 2)。流域内地形跌宕起伏呈槽谷状,兼有平坝、丘陵、山地多元地貌组合特征,全程多河滩,海拔为 200~1 136 m。流域为亚热带季风气候,气候温暖湿润,多年平均降水量 1 100 mm。流域土地利用以耕地、林地和水域为主,耕地占比近 80%,粮食年产量达 108.47 万 t,约占重庆全市粮食产量的 10.03%,是重庆市重要的商品粮基地。

## 2 试验方法与数据处理

### 2.1 数据处理

2.1.1 数据来源 根据 InVEST 模型 3 个模块运行需求,本研所需数据类型及来源见表 1。

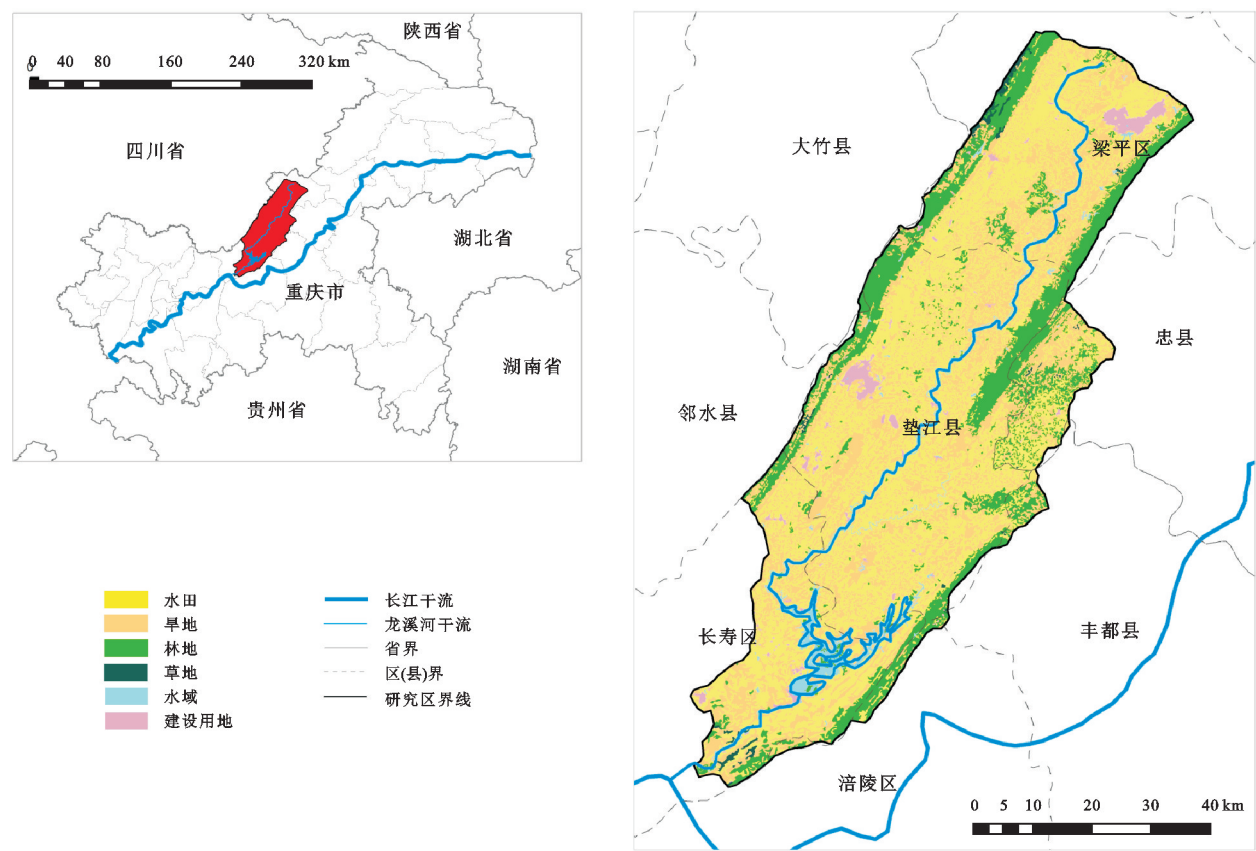


图 1 研究区位置

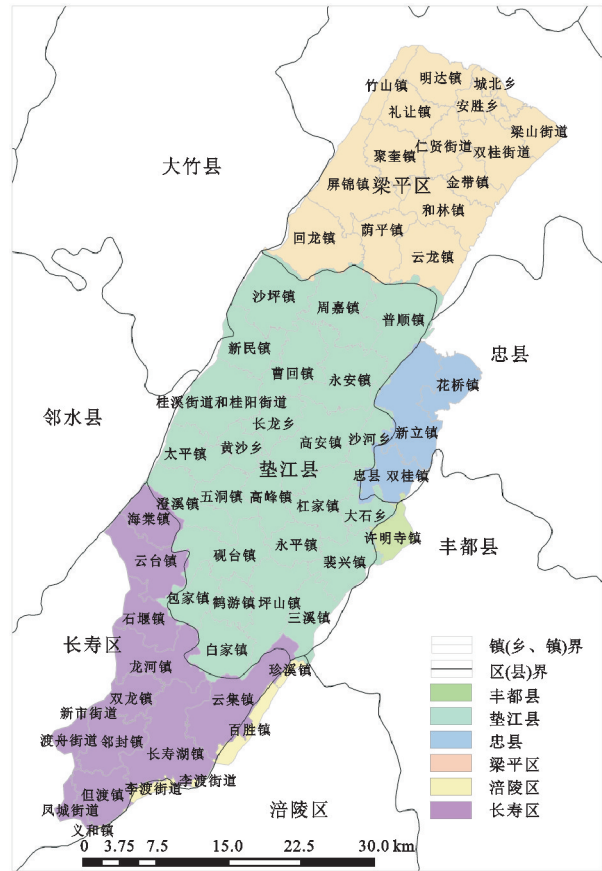


图 2 研究区区县行政区划

2.1.2 数据预处理与本土化 利用 ArcGIS 10.6 基于龙溪河流域矢量范围掩膜提取得到研究区 Land-

use 数据、DEM 数据、气候数据、土壤数据等,统一坐标并规范数据格式。因研究区耕地占比大,将 InVEST 模型所需要的植物可利用含水量(PAWC)、季节常数(Zhang 系数)、生物物理系数表进行本土化具有较大意义。

(1)PAWC 本土化。PAWC 可以利用田间持水量(FMC)减去永久萎蔫系数(WC)获取:

$$PAWC=FMC-WC \tag{1}$$

$$FMC=3.075\times10^{-3}\times Sand+5.886\times10^{-3}\times Silt+8.039\times10^{-3}\times Clay+2.208\times10^{-3}\times OM-0.1434\times BD \tag{2}$$

$$WC=-5.9\times10^{-5}\times Sand+1.142\times10^{-3}\times Silt+5.766\times10^{-3}\times Clay+2.228\times10^{-3}\times OM+2.671\times10^{-2}\times BD \tag{3}$$

式中:Sand 为土壤沙粒百分比含量(%);Silt 为土壤粉粒百分比含量(%);Clay 为土壤黏粒百分比含量(%);OM 为有机质百分比含量(%);BD 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)。

(2)Zhang 系数本土化。Zhang 系数由 Xu 等<sup>[21]</sup>提出的  $\omega$  经验常数计算得到,其计算公式为:

$$Z=\frac{(\omega-1.25)p}{AWC} \tag{4}$$

$$\omega=5.05722-0.09322LAT+0.13085CTI+1.31697NDVI+3\times10^{-5}\times A-1.8\times10^{-4}\times elev \tag{5}$$

式中:  $Z$  为季节常数, 表示区域降雨等特征;  $P$  为年平均降水量 (mm);  $AWC$  为平均植物可利用含水量 (mm);  $elev$  为研究区平均高程 (m);  $A$  为研究区面积 ( $\text{km}^2$ );  $LAT$  为研究区中心纬度;  $CTI$  为地形湿度指数, 可通过 ArcGIS 10.6 水文分析工具用 DEM 数据

计算得到;  $NDVI$  为植被归一化指数, 可利用 Google earth engine 平台, 基于 MODIS 数据计算的研究区 2000—2020 年的年平均  $NDVI$  指数 (图 3)。

利用 2000 年、2010 年、2020 年的  $NDVI$  指数, 计算获得龙溪河流域本土化的 Zhang 系数 (表 2)。

表 1 研究数据类型及来源

| 数据类型                         | 数据来源                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 土地利用数据                       | 中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心云平台 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )                                                                                                                                                                                                             |
| 高程数据                         | 中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心云平台 ( <a href="http://www.resdc.cn">http://www.resdc.cn</a> )                                                                                                                                                                                                             |
| 集水区                          | 基于河网及地形特征 (坡度、海拔) 等子流域划分依据, 利用 ArcGIS 10.6 水文分析模块, 以研究区的 DEM 数据为基础, 通过河网提取、填洼、流域分割等步骤确定研究区边界、水系和子流域, 共形成 75 个小流域                                                                                                                                                                                   |
| 年均降水量                        | 国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn">www.geodata.cn</a> ) 1901—2020 年中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集, 栅格计算的年均数据                                                                                                                                                                                      |
| 年均潜在蒸散量                      | 国家地球系统科学数据中心 ( <a href="http://www.geodata.cn">www.geodata.cn</a> ) 1990—2020 年中国 1 km 分辨率逐月潜在蒸散量数据集, 栅格计算的年均数据                                                                                                                                                                                    |
| 土壤基础数据                       | 世界土壤数据库 (HWSD, Harmonized World Soil Database) ( <a href="https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/">https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/</a> ) 的全球土壤栅格数据 |
| 根系埋藏深度                       | 世界土壤数据库基础数据                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 植物可利用含水量                     | 运用土壤基础数据计算所得                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 降雨侵蚀因子                       | 欧洲土壤数据中心 (ESDAC) 的全球降雨侵蚀数据集 ( <a href="https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-rainfall-erosivity">https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-rainfall-erosivity</a> )                                                                                                                    |
| 土壤侵蚀因子                       | 欧洲土壤数据中心 (ESDAC) 的全球土壤侵蚀数据集 ( <a href="https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erosion">https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erosion</a> )                                                                                                                                |
| Zhang 系数                     | 根据 Zhang 系数经验公式计算得到                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 坡长因子                         | 运用 DEM 数据基于 ArcGIS 软件计算得到                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 植物蒸散系数 ( $K_c$ )             | 农用地植物蒸散系数 ( $K_c$ ) 参考新联合国组织 FAO 的在线目录, 建设用地植物蒸散系数由 InVEST 使用手册提供的经验公式计算得到                                                                                                                                                                                                                         |
| 氮、磷输出系数 ( $load_n, load_p$ ) | 参考梁常德等 <sup>[22]</sup> 对于三峡库区氮磷负荷研究中各地类的氮、磷输出系数                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 水土保持因子 ( $ulsc_p$ )          | 参考才业锦 <sup>[23]</sup> 对长江南岸上游仙鱼小流域环境相关研究, 该流域与龙溪河流域均处于长江上游, 具有一定参考价值                                                                                                                                                                                                                               |
| 植物经营管理因子 ( $ulsc_c$ )        | 参考才业锦 <sup>[23]</sup> 对长江南岸上游仙鱼小流域环境相关研究, 该流域与龙溪河流域均处于长江上游, 具有一定参考价值                                                                                                                                                                                                                               |
| 地类径流系数                       | 参考刘慧芳 <sup>[24]</sup> 与龚诗涵等 <sup>[25]</sup> 对中国生态系统水源涵养空间特征相关研究                                                                                                                                                                                                                                    |

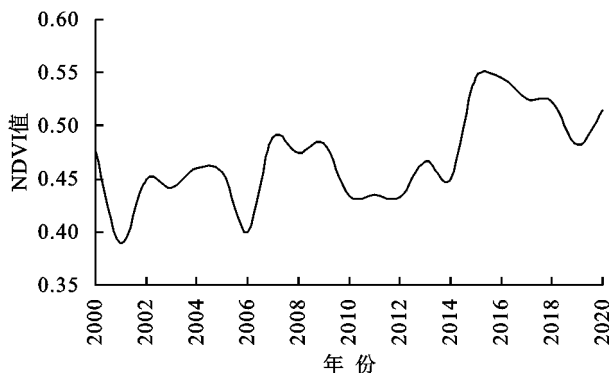


图 3 龙溪河流域 2000—2020 年  $NDVI$  曲线

表 2 龙溪河流域 Zhang 系数

| 年份   | $\omega$ | Zhang 系数 |
|------|----------|----------|
| 2000 | 4.3162   | 14.3492  |
| 2010 | 4.2596   | 12.7115  |
| 2020 | 4.3663   | 15.0042  |

生物物理系数表是 InVEST 模型中重要的表格数据, 本研究土地利用类型分为 15 小类, 属于耕地、林地、草地、水域、建设用地 5 大类 (表 3)。除前文已获取数据, 农用地植物蒸散系数 ( $K_c$ ) 参考新联合国组织 FAO 的在线目录, 建设用地植物蒸散系数由 InVEST 使用手册提供的经验公式计算得到, 以  $f$  代表不透水地面占研究区域的比例, 公式为:

$$K_{c(\text{建设区})} = f \times 0.1 + (1 - f) \times 0.6 \quad (6)$$

## 2.2 研究方法

InVEST 3.10.2 模型<sup>[26]</sup>作为一种生态系统服务研究工具, 其采用生产函数的方式量化和评估生态系统服务, 以供应、服务和价值为基本框架, 对陆地、淡水系统和海洋系统进行分析, 能够实现对生态系统服务的多方位估算。龙溪河流域的水生态系统为内陆淡水生态系统, 故此本研究选取淡水生态服务部分的年产水、水质净化、水土保持模块对流域水生态系统服务进行探究和揭示。

## 2.3 研究原理

2.3.1 产水与水源涵养 InVEST 的年产水模块通过估计研究区不同部分的产水量, 可揭示土地利用变化对地表产水量。模块基于 Budyko 水热耦合平衡原理和年平均降水量资料将产水量估计方程设定为:

$$Y(x) = \left[ 1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (7)$$

式中:  $Y(x)$  为年产水量 (mm);  $x$  为每个栅格单元;  $\frac{AET(x)}{P(x)}$  为土地覆被类型对应的植物蒸散量;  $P(x)$  为栅格单元  $x$  的年降水量 (mm)。

表 3 生物物理系数

| 地类名称 | Land use code | lulc_veg | root_depth | Kc  | Load_n | Eff(n) | Load_p | Eff(p) | usle_c | usle_p |
|------|---------------|----------|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 水田   | 11            | 1        | 10 000     | 0.3 | 15.0   | 0.04   | 2.30   | 0.40   | 0.10   | 0.10   |
|      | 12            | 1        | 10 000     | 0.3 | 15.0   | 0.40   | 2.30   | 0.40   | 0.30   | 0.40   |
|      | 21            | 1        | 10 000     | 0.6 | 2.5    | 0.75   | 0.15   | 0.75   | 0.005  | 0.80   |
|      | 22            | 1        | 10 000     | 0.9 | 2.5    | 0.65   | 0.15   | 0.65   | 0.10   | 0.60   |
|      | 23            | 1        | 10 000     | 0.5 | 2.5    | 0.70   | 0.15   | 0.70   | 0.10   | 0.65   |
|      | 24            | 1        | 10 000     | 0.7 | 2.5    | 0.72   | 0.15   | 0.72   | 0.005  | 0.70   |
|      | 31            | 1        | 10 000     | 0.4 | 6.0    | 0.50   | 0.80   | 0.50   | 0.04   | 0.45   |
| 旱地   | 32            | 1        | 10 000     | 0.5 | 6.0    | 0.45   | 0.80   | 0.45   | 0.05   | 0.40   |
|      | 33            | 1        | 10 000     | 0.8 | 6.0    | 0.40   | 0.80   | 0.40   | 0.08   | 0.35   |
|      | 41            | 0        | -1         | 1.0 | 15.0   | 0.01   | 0.36   | 0.01   | 0      | 0      |
|      | 42            | 0        | -1         | 1.0 | 15.0   | 0.01   | 0.36   | 0.01   | 0      | 0      |
|      | 43            | 0        | -1         | 1.0 | 15.0   | 0.01   | 0.36   | 0.01   | 0      | 0      |
|      | 51            | 0        | -1         | 0.6 | 13.0   | 0.05   | 1.80   | 0.05   | 0      | 0      |
|      | 52            | 0        | -1         | 0.6 | 13.0   | 0.05   | 1.80   | 0.05   | 0      | 0      |
|      | 53            | 0        | -1         | 0.6 | 13.0   | 0.05   | 1.80   | 0.05   | 0      | 0      |

$$\frac{AET(x)}{P(x)}=1+\frac{PET(x)}{P(x)}-\left[1+\left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^{\omega}\right]^{1/\omega}$$

(8)

式中:PET(*x*)为栅格 *x* 的潜在蒸散量; $\omega$  为经验参数;其他参数含义同公式(1)。PET(*x*)定义为:

$$PET(x)=K_c(l_x)\times ET_0(x)$$

(9)

$$\omega(x)=Z\frac{AWC(x)}{P(x)}+1.25$$

(10)

$$AWC(x)=\text{Min}(\text{REst,layer,depth,root,depth})\times PAWC$$

(11)

式中: $K_c(l_x)$ 为栅格 *x* 上土地覆被的植被蒸散系数; $ET_0(x)$ 为通过参考作物蒸散量所反映的当地气候条件;AWC(*x*)为土壤有效含水量(mm);PAWC 为植物可利用含水量。

最后,基于已经算得的产水量结果,运用水量平衡方程,计算得到研究区水源涵养量。

$$TQ=\sum_{n=1}^m(P_n-R_n-ET_n)\times A_n=(Y_{nx}-R_n)\times A_n$$

(12)

$$R_n=P_n\times\alpha_n$$

(13)

式中:TQ 为总水源涵养量( $\text{m}^3$ ); $P_n$ 为降雨量(mm); $R_n$ 为地表径流量(mm); $ET_n$ 为蒸散发(mm); $A_n$ 为 *n* 类土地利用类型的面积; $Y_{nx}$ 为第 *x* 个栅格位置的第 *n* 类土地利用类型的产水量(mm); $\alpha_n$  为 *n* 类土地利用类型的径流系数;*n* 为研究区第 *n* 类土地利用类型;*m* 为研究区土地利用类型数。

2.3.2 水质净化 InVEST 的水质净化模块通过绘制研究区流域的养分来源及养分向河流输送情况,为人类提供自然养分循环信息。该模型采用质量平衡方法,描述营养物质在研究区域空间内运动情况。其步骤为:

第 1 步,利用土地利用类型的营养负荷率确定营

养负荷,而后采用研究区域的径流潜力修正栅格单元的营养负荷,修正后栅格单元 *i* 上的营养负荷(modified.load<sub>*xi*</sub>)可定义为

$$\text{modified.load}_{xi}=\text{load}_{xi}\times\text{RPI}_{xi}$$

(14)

$$\text{RPI}_i=RP_i/RP_{av}$$

(15)

式中:load<sub>*xi*</sub>为第 *x* 个栅格单元 *i* 上的营养负荷量;RPI<sub>*i*</sub>为每个栅格 *i* 上的径流潜力指数;RP<sub>*i*</sub>为每个栅格 *i* 上径流的营养径流指数;RP<sub>*av*</sub>为降水量。

第 2 步,计算营养传输比率(NDR<sub>*i*</sub>),利用 NDR<sub>0,*i*</sub>与修正后的营养负荷计算营养物输出量(Export<sub>(Nutrient)</sub>)。NDR<sub>*i*</sub>可定义为:

$$\text{NDR}_i=\text{NDR}_{0,i}\left[1+\exp\left(\frac{IC_0-IC_i}{k}\right)\right]^{-1}$$

(16)

$$\text{NDR}_{0,i}=1-\text{eff}_i'$$

(17)

$$\text{Export}_{(\text{Nutrient})}=\text{modified.load}_{xi}\times\text{NDR}_{0,i}$$

(18)

式中:IC<sub>*i*</sub>为描述泥沙淤积物与集水区之间的空间关联指数;IC<sub>0</sub>与 *k* 为校准参数,本研究分别取值为 0.5 和 2.0;eff<sub>*i*</sub>'为某一土地利用类型的某种营养物质的最大有效保留率。

2.3.3 土壤保持 InVEST 的土壤保持模块可描述坡面土壤侵蚀与泥沙淤积的生成和向河流输送的情况,其结果能为集水区水土保持和减轻流域泥沙淤积提供指导,模块以土壤流失方程并结合已有研究<sup>[27]</sup>提出泥沙输送比率理论为基础改良计算土壤侵蚀量。

第 1 步,利用土壤流失方程计算年土壤流失量(usle<sub>*i*</sub>):

$$\text{usle}_i=R_i\times K_i\times LS_i\times C_i\times P_i$$

(19)

式中: $R_i$ 为降水侵蚀因子; $K_i$ 为土壤侵蚀性因子; $LS_i$ 为坡度坡长因子; $C_i$ 为植物经营管理因子; $P_i$ 为土壤保持因子。

第 2 步,计算描述土壤侵蚀与集水区之间关系的空

间关联指数  $IC$ ,而后利用  $IC$  计算泥沙输送比( $SDR_i$ )。

$$IC=\log_{10}\left(\frac{D_{up}}{D_{dn}}\right)$$

(20)

$$SDR_i=\frac{SDR_{max}}{1+\exp\left(\frac{IC_0-IC_i}{k}\right)}$$

(21)

$$Export_{(Sediment)}=usle_i\times SDR_i$$

(22)

式中: $D_{up}$ 为上游集水区土壤侵蚀量; $D_{dn}$ 为下游或坡下土壤淤积量; $SDR_{max}$ 为理论最大的泥沙输送比率; $Export_{(Sediment)}$ 为实际土壤侵蚀量。

3 结果与分析

3.1 水生态系统服务时空变化特征

3.1.1 产水与水源涵养服务 产水系数能够反映研

究区的产水服务能力,2020 年流域产水系数最大,其产水服务能力最强,该年水源涵养量为  $24.28\times 10^8\text{ m}^3$ ,水源涵养能力最强;2010 年流域产水系数仅为 0.680 9,水源涵养量为  $20.03\times 10^8\text{ m}^3$ ,该年流域产水服务与水源涵养能力最弱(表 4)。整体上,龙溪河流域生态系统产水服务能力与水源涵养能力随时间变化总体呈现出先减弱再增强的趋势,与区域降雨变化趋势一致,因此流域的产水能力与水源涵养能力受降雨影响较大。流域产水服务在流域中部、北部相对稍强,但是总体空间分异不大,水源涵养能力则在流域北部梁平区的贤仁、安胜、明达、礼让等镇街,以及垫江县的周嘉镇较强,其水源涵养深度在 2000 年、2020 年均超过 800 mm(图 4)。

表 4 龙溪河流域 2000—2020 年产水量

| 年份   | 降水总量/<br>$\times 10^8\text{ m}^3$ | 年均产水<br>深度/mm | 产水总量/<br>$\times 10^8\text{ m}^3$ | 产水系数   | 水源涵养<br>深度/mm | 水源涵养<br>总量/ $\times 10^8\text{ m}^3$ |
|------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|--------|---------------|--------------------------------------|
| 2000 | 34.69                             | 772.94        | 24.91                             | 0.7218 | 729.19        | 23.50                                |
| 2010 | 31.31                             | 661.43        | 21.32                             | 0.6809 | 621.37        | 20.03                                |
| 2020 | 35.70                             | 801.23        | 25.83                             | 0.7235 | 753.24        | 24.28                                |

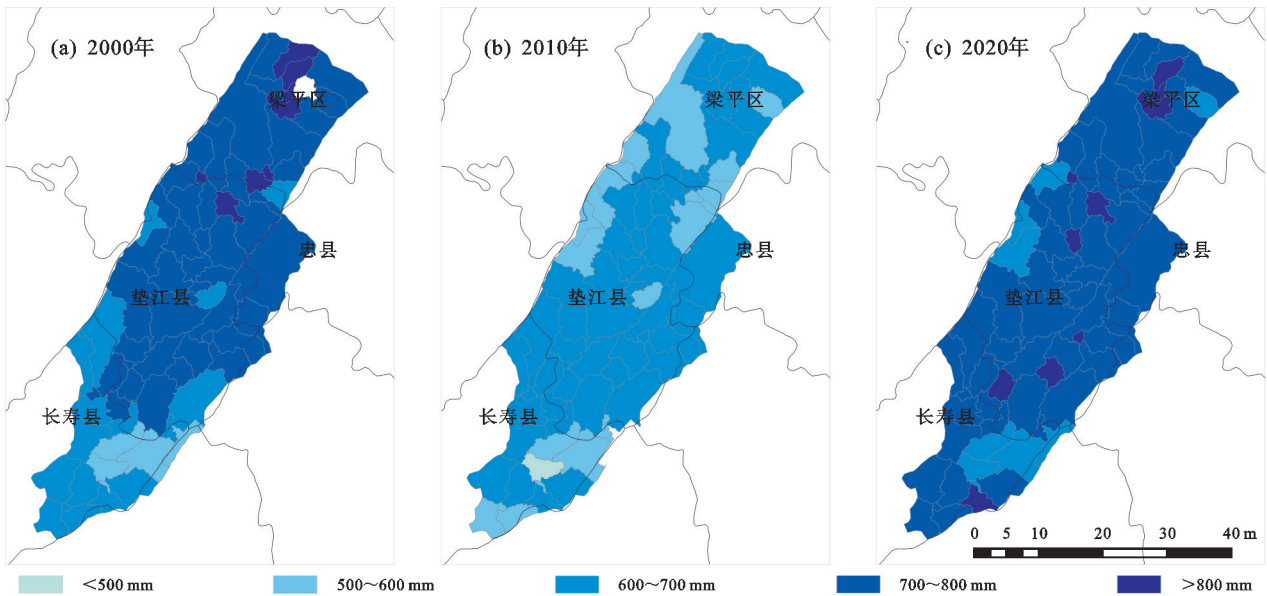


图 4 龙溪河流域 2000 年、2010 年、2020 年水源涵养空间分布

3.1.2 水质净化服务 氮磷输出量越少代表流域水质净化服务越强。龙溪河流域氮、磷负荷和输出总体呈现减少趋势,流域水质净化能力逐渐增强(表 5、图 5)。20 年间,流域总氮输出量由 2000 年的  $11.53\times 10^5\text{ kg}$  减少到 2020 年的  $11.25\times 10^5\text{ kg}$ ,年均净减少量达  $0.28\times 10^4\text{ kg}$ 。流域总磷输出量由 2000 年的  $1.72\times 10^5\text{ kg}$  降至  $1.66\times 10^5\text{ kg}$ ,10 年减少量为  $0.6\times 10^4\text{ kg}$ 。受地形条件和土地利用类型的影响,氮、磷输出量空间上存在较大的分异性。单位面积氮、磷输出量相对较高、水质净化能力相对较差的区域主要分布在城镇、工业建设空间相对集聚的地方,如梁平区的

屏锦、竹山、聚奎等镇,垫江县的桂溪、桂阳、太平、澄西等镇街,以及忠县花桥、新立等镇。单位面积氮、磷输出量相对较低、水质净化能力相对较强的区域主要分布在林地比重较大的地方,如梁平区的回龙、沙坪,垫江县的新民等乡镇。

表 5 2000 年、2010 年、2020 年龙溪河流域氮、磷输出特征

| 年份   | 总氮输出/<br>$\times 10^5\text{ kg}$ | 总磷输出/<br>$\times 10^5\text{ kg}$ | 单位面积氮输出/<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | 单位面积磷输出/<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) |
|------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 2000 | 11.53                            | 1.72                             | 3.58                                           | 0.53                                           |
| 2010 | 11.23                            | 1.67                             | 3.48                                           | 0.52                                           |
| 2020 | 11.25                            | 1.66                             | 3.49                                           | 0.51                                           |

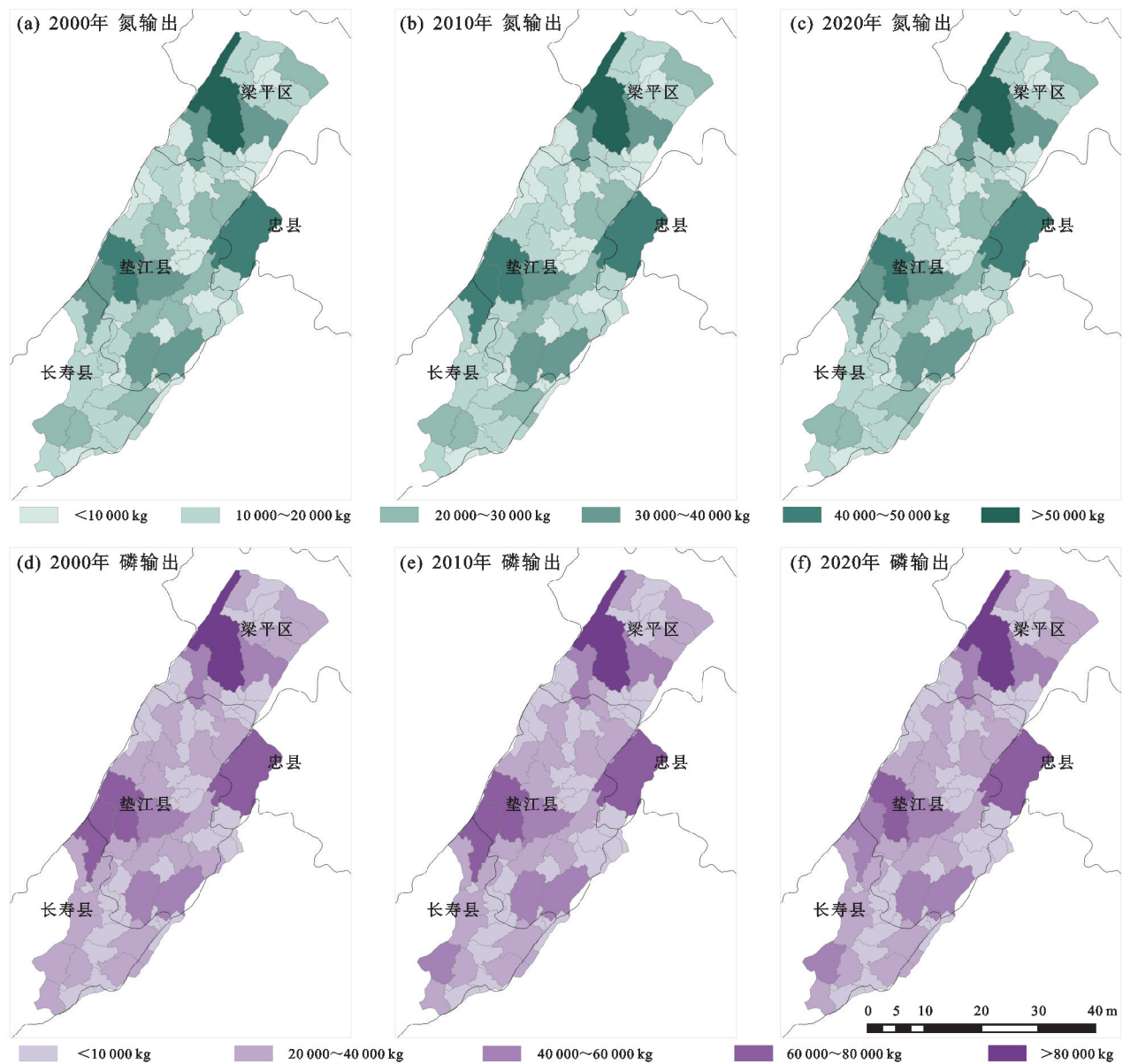


图 5 2000 年、2010 年、2020 年龙溪河流域氮、磷单位面积输出

3.1.3 土壤保持服务 根据近 20 年龙溪河流域土壤侵蚀与土壤保持情况统计分析结果(表 6)显示,龙溪河流域实际土壤侵蚀量逐年减少,土壤保持服务能力不断增强。从全域平均土壤侵蚀模数变化来看,土壤侵蚀模数由 2000 年的 6.78 t/hm<sup>2</sup>降至到 2020 年的 6.16 t/hm<sup>2</sup>,降幅达 9.3%。参照中华人民共和国水利部发布的土壤侵蚀强度分级标准(表 7),龙溪河流域总体为轻度侵蚀。依据各小流域的实际侵蚀量获取的侵蚀模数表明,全域 75 个小流域为轻度侵蚀或微度侵蚀,轻度侵蚀小流域的面积占比占全流域比重超过 50%。流域土壤保持服务能力空间上呈现出一定的分异性,流域中部向水域、建设用地、林地集中区土壤保持服务能力较强,流域东西两侧坡地位置土壤保持服务能力相对较弱(图 6)。

3.2 土地利用对水生态系统服务的影响

3.2.1 研究区土地利用状况 龙溪河流域土地利用主要包括耕地、林地、草地、水域、建设用地等 5 种

类型。其中,耕地、林地、草地为流域主要土地利用类型,其占比达 90%以上。近 20 年,受人类活动剧烈扰动的影响,龙溪河流域土地利用格局发生显著的变化(图 7、图 8)。耕地、草地持续减少,土地利用变化动态度分别为 -0.18%, -0.45%。受建设占用和退耕还林等主要因素影响,研究区耕地以年均 4.7 km<sup>2</sup>的速度持续减少,20 年间耕地总计减少 94.15 km<sup>2</sup>。减少耕地主要分布在以县城、镇街为中心的周边地区,耕地减少最多的(15.36 km<sup>2</sup>)是梁平区双桂街道,其次是垫江县的桂溪街道和桂阳街道,共计减少 14 km<sup>2</sup>。流域草地面积减少相对较小,20 年总计减少 2.23 km<sup>2</sup>。20 年间,流域城镇建设用地、林地、水域总体呈增加趋势,尤其以城镇建设拓展为主导的建设用地增加最多、变化最剧烈,20 年内总共增加 43.93 km<sup>2</sup>,土地利用变化动态度为 10.2%。建设用地增加主要分布在梁平区、垫江县、长寿区的中心镇(街道);其次,因生态工程建设林地增加 34.47 km<sup>2</sup>。

因水利工程建设,水域增加主要分布在长寿区的长寿湖区域,共计增加 17.98 km<sup>2</sup>。

表 6 2000 年、2010 年、2020 年龙溪河流域土壤侵蚀与土壤保持特征

| 年份   | 实际侵蚀/<br>×10 <sup>6</sup> t | 土壤侵蚀模数/<br>(t·hm <sup>-2</sup> ) | 土壤保持总量/<br>×10 <sup>6</sup> t |
|------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 2000 | 2.18                        | 6.78                             | 2.89                          |
| 2010 | 2.09                        | 6.48                             | 2.86                          |
| 2020 | 1.98                        | 6.16                             | 2.84                          |

表 7 土壤侵蚀强度分级

| 土壤侵蚀模数/(t·hm <sup>-2</sup> ) | 侵蚀强度  |
|------------------------------|-------|
| <5                           | 微度侵蚀  |
| 5~25                         | 轻度侵蚀  |
| 25~50                        | 中度侵蚀  |
| 50~80                        | 强烈侵蚀  |
| 80~150                       | 极强烈侵蚀 |
| >150                         | 剧烈侵蚀  |

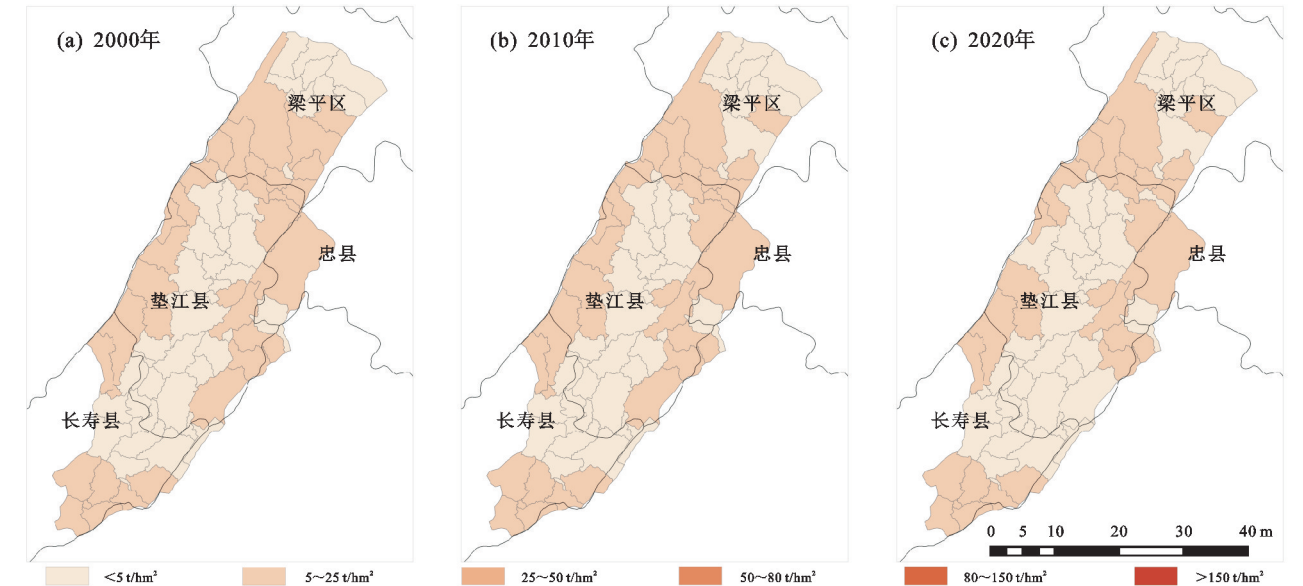


图 6 2000 年、2010 年、2020 年龙溪河流域实际土壤侵蚀分布

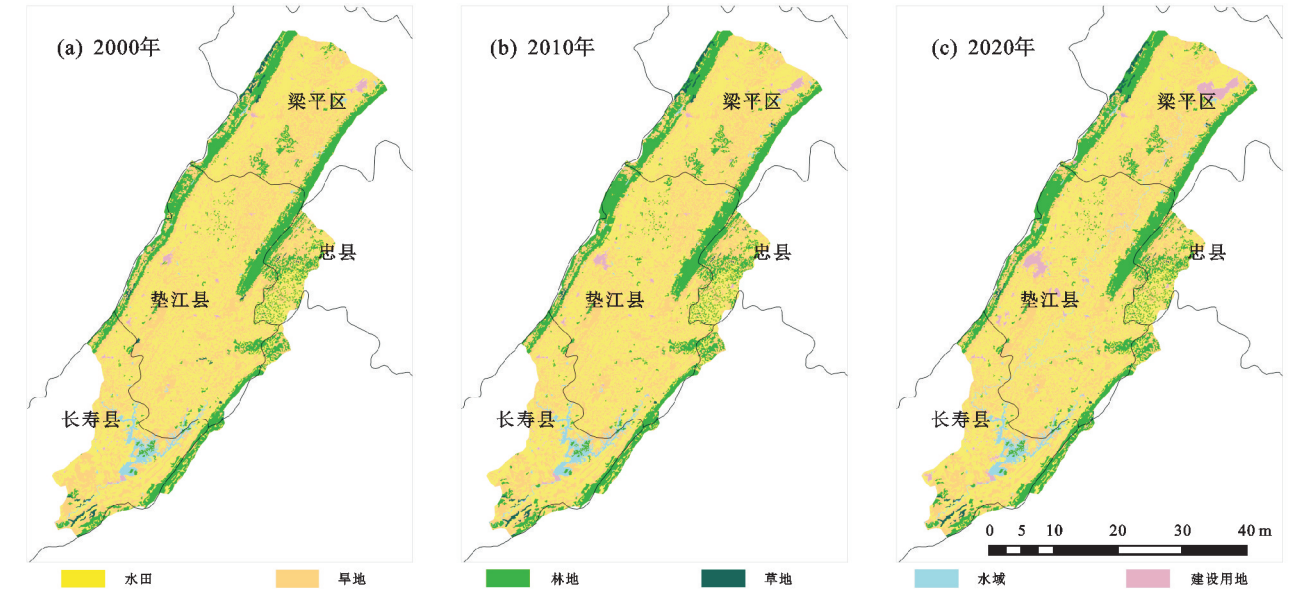


图 7 2000 年、2010 年、2020 年龙溪河流域土地利用现状

3.2.2 土地利用对年产水与水源涵养变化的响应  
产水系数代表降水转化为水资源的能力,因此可用产水系数的大小来反映流域产水能力的强弱。各地类产水系数(图 9a)表明,其产水服务能力由强到弱表现为耕地>林地>建设用地>草地>水域。耕地产水系数最大,产水总量为各地类中最高,20 年内耕地总产水量均占全域总产水量 80%。建设用地、林地产水系数也较

大,产水能力较强,随着其面积持续增加对产水服务起促进作用。全域耕地占比大以及建设用地增多产生的硬化地表形成径流汇集水资源是流域产水服务功能整体较强的主要原因。而又由于耕地主要分布于流域中部和北部(图 7),如垫江县的周嘉、曹回、高峰、砚台等镇,致使流域中北部产水服务相对其他区域较强。根据图 9b,可判断各地类水源涵养能力强弱表现为耕地>草

地>水域>林地>建设用地。2000 年、2010 年草地水源涵养深度大于水域,2020 年却小于水域,这与草地面积持续减少使得水源涵养能力减弱有关,建设用地虽然表现出较好的产水服务能力,但是其硬化地表垫层无法储水,使其水源涵养能力最弱。因此,2020 年建设用地较密集的梁平区的双桂街道,垫江县的桂溪、桂阳、新民等镇街的水源涵养能力明显弱于其他地区。

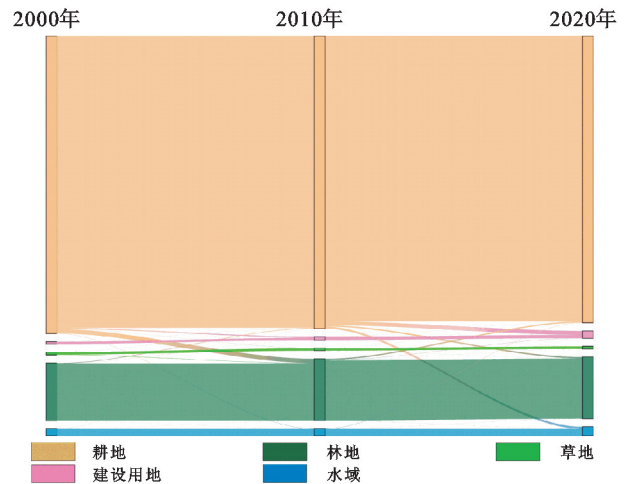
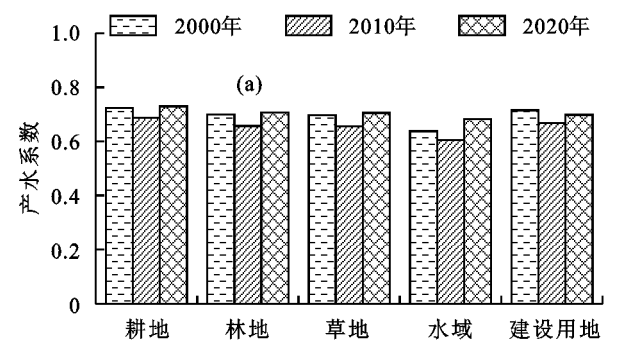


图 8 2000—2020 年龙溪河流域土地利用转移桑基图

3.2.3 土地利用对水质净化服务变化的响应 根据



流域氮、磷输出量结果(图 10),各地类水质净化能力由强到弱排序为林地>草地>建设用地>耕地>水域。20 年内,耕地、林地、草地、建设用地单位面积氮、磷输出量总体减少,其中耕地单位面积氮输出量减少最多,共计减少 0.16 kg/hm<sup>2</sup>;建设用地单位面积磷输出减少最多,共计减少 0.031 9 kg/hm<sup>2</sup>。水域单位面积氮、磷输出量则逐年增加,其中单位面积氮输出共增加 0.13 kg/hm<sup>2</sup>,单位面积磷输出量共增加 0.031 2 kg/hm<sup>2</sup>。总体上,全域氮、磷输出呈减少趋势,结合土地利用变化情况分析可知,耕地面积持续减少,农业生产使用的化肥减少,使研究区氮、磷负荷总量减少;其次,林地增加也一定程度削弱氮、磷污染。水域的单位面积氮、磷输出量最高并随时间呈增加趋势,这与水域面积扩张,城镇中人类生产生活排放的氮、磷污染物随着增多的硬化地表形成的径流汇集至河流中以及耕地上农业生产氮磷肥随降雨汇集到水域之中有关。空间上流域氮、磷输出量相对较高区域为各区县中心镇街以及工业发展较好的镇街,这与人类生产生活排放的氮磷污染物较多,以及建设用地上植被覆盖较少、硬化地水质净化能力弱有关。

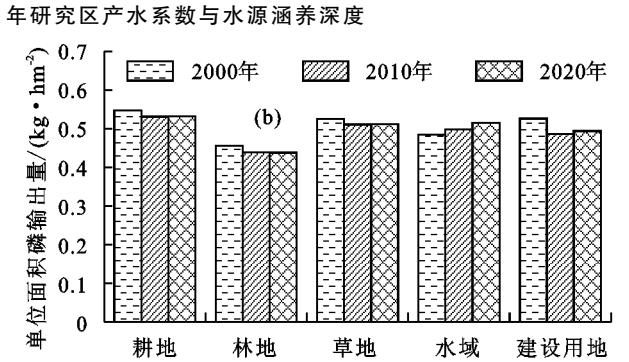
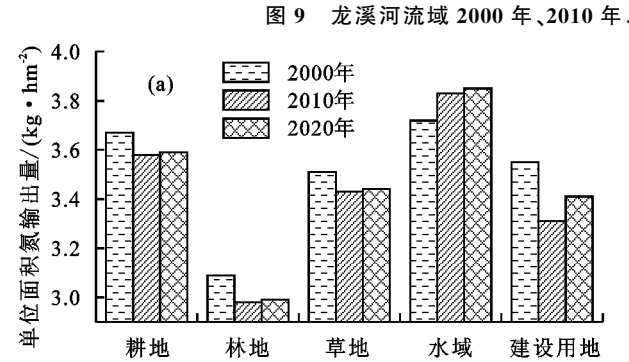
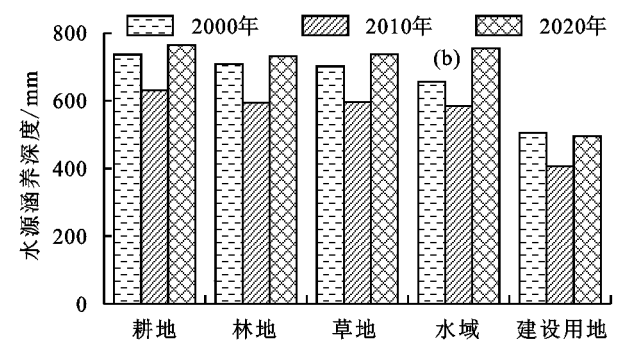


图 9 龙溪河流域 2000 年、2010 年、2020 年研究区产水系数与水源涵养深度

图 10 龙溪河流域 2000 年、2010 年、2020 年单位面积氮、磷输出量

3.2.4 土地利用对土壤保持服务变化的响应 根据不同土地利用类型土壤侵蚀结果(图 11),水域和建设用地表现为微度侵蚀,耕地、林地、草地则为轻度侵蚀。流域土壤保持服务能力由强到弱表现为水域>建设用地>耕地>林地>草地。20 年内,各地类中仅草地侵蚀程度加重,耕地、林地、水域、建设用地土壤侵蚀程度逐年减弱。建设用地土壤侵蚀模数变化

最大,年均减少 0.054 t/hm<sup>2</sup>,由轻度侵蚀转变为微度侵蚀;其次为林地土壤侵蚀程度减轻最多,其土壤侵蚀模数年均减少 0.049 t/hm<sup>2</sup>。总体上,全域土壤侵蚀程度明显减轻,结合土地利用变化情况分析,建设用地、水域、林地面积大量增加是全域土壤侵蚀减轻主要原因。

空间上,流域土壤侵蚀相对较为严重区域位于流

域两侧坡地和各个区县中心镇街,但随着林地和水域面积的增加,土壤侵蚀较为严重的区域范围明显缩小。值得一提的是,建设用地在建设过程中的裸露地表增会导致土壤侵蚀程度加剧,当建设完成地表硬化后,土壤侵蚀程度则有效减缓。

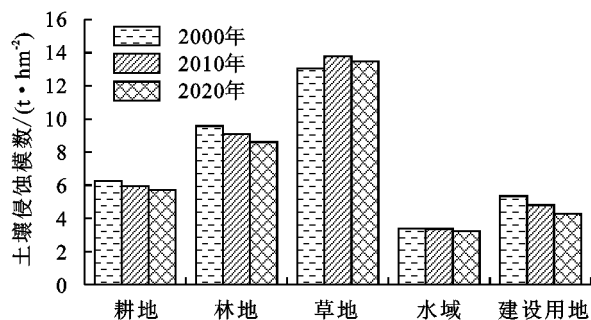


图 11 龙溪河流域 2000 年、2010 年、2020 年各地类土壤侵蚀模数

## 4 讨论

本文从土地利用视角对水生态系统服务时空变化进行了研究,研究结果与现有水生态系统服务相关研究具有一致性。流域产水与水源涵养能力受降雨影响较大,耕地占比大、建设用地的硬化地表形成地表径流汇集水资源使得流域产水能力强,这与胡文敏等<sup>[13]</sup>与刘宥延等<sup>[19]</sup>研究结果一致。流域耕地、草地具较强水源涵养能力,建设用地水源涵养能力较弱,这与黄菁等<sup>[28]</sup>研究结果相似,但龙溪河流域林地的水源涵养能力在各地类中并不突出,这与其存在一定差异,其原因可能是林地处于研究区两侧坡地,水资源受地形影响向中部汇集以及林地植物蒸腾作用较强。针对水质净化服务与水土保持服务,本研究与李屹峰等<sup>[11]</sup>研究结果一致,认为林地植被丰富、植物根系发达,削弱污染物、缓解水土流失能力较强,建设用地不断扩张,人类生产生活则会使得全域氮、磷输出增多,流域水质净化服务减弱。王莉雁等<sup>[27]</sup>提出城镇用地扩张时,建设时期对土壤侵蚀不利,但是建设完成后能缓解土壤侵蚀,这与本文认为建设用地增加能增强土壤保持服务观点一致。

本研究从镇域尺度与小流域角度出发,以重庆商品粮基地龙溪河流域为研究对象,研究结果能为区域国土空间规划和生态环境保护提供依据。研究区农业生产用地耕地面积持续减少,生态用地林地有所增加使得水质净化、土壤保持服务被增强,这证实通过退耕还林等生态措施能够有效提升区域生态系统服务,但耕地又承担了维护流域产水与水源涵养与重庆粮食安全两方重责,所以龙溪河流域不适宜大规模开展退耕还林。因此,为平衡供给与调节服务,在未来应基于流域乡镇发展情况与地形条件进行功能分区

采取不同措施。首先,流域东西两侧竹山镇至海棠镇沿线和花桥镇至云集镇沿线等坡度较陡的林地聚集区可划分为生态修复区,应持续推进该区域水土保持工程,并对林地附近的坡耕地逐步推进退耕还林等生态项目。其次,将流域中北部等地势平坦、水源充沛位置划为农业生产区,即垫江县的周嘉、曹回、永安至高峰、砚台一线等镇街以及梁平区的安胜、明达、城北等乡镇,可在以上区域推进土地整治项目、引入新兴科技,提高耕地单产,推动农业生产发展,保证流域粮食供给。最后,建设用地虽然对生态系统服务具有一定贡献,但其对于生态系统服务的负面影响不可忽视,因此在未来规划中,应结合现有中心城镇,如垫江县的桂阳、桂溪街道,梁平区的双桂街道等,划定城镇发展区,加强城镇建设用地集约节约利用以及推动城镇防污排污治理工作。

本研究在参数本土化基础上运用 InVEST 模型,较好实现了对龙溪河流域水生态系统服务与土地利用之间关系的刻画,并为通过土地利用管理实现区域生态功能与农业生产功能平衡提出一定合理建议,研究具有一定意义。但是研究运用的 InVEST 模型主要依靠现有的生物物理参数和部分气候、土壤等理化条件完成流域生态系统服务研究,而流域实际环境复杂,包含了人文和模型未计算的自然因素,因此评价结果精度仍可进一步提升,在未来研究可考虑引入人文指标结合野外勘测等开展进一步的研究。

## 5 结论

(1)全域 20 年年产水服务与水源涵养能力总体增强并受降雨和土地利用变化影响呈先减弱再增强的阶段性变化,全域产水与水源涵养服务空间差异较小,在流域中部和北部相对较强。各地类产水能力排序为耕地>林地>建设用地>草地>水域;水源涵养能力排序为耕地>草地>水域>林地>建设用地。研究区主要土地利用类型耕地具有较强的产水与水源涵养能力,这是流域产水与水源涵养功能较强主要原因。

(2)流域水质净化服务也呈增强趋势,水质净化服务较弱区域为龙溪河干流两侧以及流域内建设空间密度较大场镇、工业区。不同地类水质净化服务强弱排序为林地>草地>建设用地>耕地>水域。林地增加与耕地减少是流域水质净化服务增强的主要原因;建设用地增多则对水质净化服务存在一定负面影响。

(3)流域土壤保持服务呈增强趋势,全域为轻度侵蚀且侵蚀程度逐年减轻,土壤保持服务在水域、建设用地、林地聚集区较强,流域两侧坡度较陡区域较弱。各地类土壤保持服务强弱排序为水域>建设用

地>耕地>林地>草地。林地、耕地对于土壤侵蚀削弱作用最强,水域面积增加也一定程度缓解水土流失;建设用地增加,修建过程不利于土壤保持,修建完成后硬化地表增多,能有效减轻土壤侵蚀。

(4)利用 InVEST 模型基于镇域尺度与小流域视角能够实现对水生态系统与土地利用关系的研究。为平衡流域生态与生产功能,宜以乡镇为单元将龙溪河流域合理划分为生态修复区、农业生产区和城镇发展区。

#### 参考文献:

- [1] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystem[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [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] 傅伯杰.我国生态系统研究的发展趋势与优先领域[J].地理研究,2010,29(3):383-396.
- [4] 王梓洋,石培基,张学斌,等.基于栅格尺度的生态安全评价及生态修复:以酒泉市肃州区为例[J].自然资源学报,2022,37(10):2736-2749.
- [5] 孙福红,郭一丁,王雨春,等.我国水生态系统完整性研究的重大意义、现状、挑战与主要任务[J].环境科学研究,2022,35(12):2748-2757.
- [6] 闫人华,高俊峰,黄琪,等.太湖流域圩区水生态系统服务功能价值[J].生态学报,2015,35(15):5197-5206.
- [7] 赵同谦,欧阳志云,王效科,等.中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].自然资源学报,2003,18(4):443-452.
- [8] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等.水生态服务功能分析及其间接价值评价[J].生态学报,2004,24(10):2091-2099.
- [9] Zhu Z, Woodcock C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data[J].Remote Sensing of Environment,2014,144:152-171.
- [10] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [11] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响:以密云水库流域为例[J].生态学报,2013,33(3):726-736.
- [12] 高星,杨刘婉青,李晨曦,等.模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J].生态学报,2021,41(20):7974-7988.
- [13] 胡文敏,杨睿瀚,贾冠宇,等.长江流域产水功能对土地利用变化的响应及其驱动因素[J].生态学报,2022,42(17):7011-7027.
- [14] 黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.
- [15] 袁周炎妍,万荣荣.生态系统服务评估方法研究进展[J].生态科学,2019,38(5):210-219.
- [16] 张徐,李云霞,吕春娟,等.基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展[J].生态科学,2022,41(1):237-242.
- [17] 刘菊,傅斌,张成虎,等.基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):577-585.
- [18] 陈姗姗,刘康,李婷,等.基于 InVEST 模型的商洛市水土保持生态服务功能研究[J].土壤学报,2016,53(3):800-807.
- [19] 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.
- [20] 邵雅静,杨悦,员学锋.黄河流域城镇化与生态系统服务的时空互动关系[J].水土保持学报,2022,36(3):86-93,99.
- [21] Xu X L, Liu W, Scanlon B R, et al. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework[J].Geophysical Research Letters, 2013,40:6123-6129.
- [22] 梁常德,龙天渝,李继承,等.三峡库区非点源氮磷负荷研究[J].长江流域资源与环境,2007,16(1):26-30.
- [23] 才业锦.重庆市水土保持措施效应及小流域治理范式评价[D].重庆:西南大学,2010.
- [24] 刘慧芳.汾河上游流域水土资源服务功能及承载力耦合研究[D].太原:山西大学,2019.
- [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] Sharp R, Douglass J, Wolny S, et al. InVEST 3.10.2 User's Guide[M].Natural Capital Project: Stanford, 2020.
- [27] 王莉雁,肖赓,江凌,等.城镇化发展对呼包鄂地区生态系统服务功能的影响[J].生态学报,2016,36(19):6031-6039.
- [28] 黄菁,范继辉,何晓蓉.基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究[J].山地学报,2021,39(3):327-337.