

DOI: 10.5846/stxb201802060314

孔令桥,王雅晴,郑华,肖焱,徐卫华,张路,肖洋,欧阳志云.流域生态空间与生态保护红线规划方法——以长江流域为例.生态学报,2019,39(3):

Kong L Q, Wang Y Q, Zheng H, Xiao Y, Xu W H, Zhang L, Xiao Y, Ouyang Z Y. A method for evaluating ecological space and ecological conservation redlines in river basins: A case of the Yangtze River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3):

## 流域生态空间与生态保护红线规划方法 ——以长江流域为例

孔令桥<sup>1,2</sup>,王雅晴<sup>1,2</sup>,郑 华<sup>1,2</sup>,肖 焱<sup>1,2</sup>,徐卫华<sup>1,2</sup>,张 路<sup>1,2</sup>,肖 洋<sup>1,2</sup>,欧阳志云<sup>1,2,\*</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

**摘要:**生态空间是指以提供生态系统服务为主要目标的地域范围,确定生态空间范围是协调保护与发展、保障生态服务持续供给的基础。长江流域是中华民族的摇篮与中国文化发祥地之一,是中国经济发展的重要增长极,以及具有全球意义的生物多样性热点区。以长江流域为对象,探讨面向流域生态空间规划的方法与管理对策。研究中,选择生态系统服务指标(水源涵养、洪水调蓄、水质净化、水土保持和生物多样性维护)和生态敏感性指标(水土流失、石漠化和土地沙化),基于流域水文路径分析和与其关联的生态系统服务的受益人口,提出一种流域尺度的生态空间规划方法。研究结果显示,长江流域生态空间面积为 102.25 万 km<sup>2</sup>,占长江流域总面积的 57.42%,森林占 52.87%,灌丛占 19.51%,草地占 18.96%,湿地占 4.26%,保护了 79.47%的水源涵养功能,86.99%的洪水调蓄功能,78.09%的水质净化功能,80.60%的水土保持功能,以及 86.49%的自然栖息地。在生态空间规划的基础上,进一步探讨了长江流域生态保护红线的格局,现阶段生态保护红线面积为 59.25 万 km<sup>2</sup>,占长江流域总面积的 33.27%,其中上游占比 59.24%,中游和下游分别占比 38.05%和 2.71%。本文提出的规划方法与研究结果,不仅可以为长江流域生态空间规划、保障流域生态安全和促进流域经济社会可持续发展提供依据,还可以为其他流域的生态空间的规划提供参考。

**关键词:**生态空间;生态保护红线;长江流域;生态系统服务;受益人口

## A method for evaluating ecological space and ecological conservation redlines in river basins: A case of the Yangtze River Basin

KONG Lingqiao<sup>1,2</sup>, WANG Yaqing<sup>1,2</sup>, ZHENG Hua<sup>1,2</sup>, XIAO Yi<sup>1,2</sup>, XU Weihua<sup>1,2</sup>, ZHANG Lu<sup>1,2</sup>, XIAO Yang<sup>1,2</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>1,2,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Ecological space refers to the region that aims to provide ecosystem services. Determining the scope of an ecological space is the basis for coordinating conservation and development, and ensuring sustainable supply of ecosystem services. The Yangtze River Basin is the cradle of the Chinese nation; it plays an important role in the economic development of China, and it is a biodiversity hotspot with global significance. In our study, we used the Yangtze River Basin as an example to discuss the watershed-oriented methods of ecological space planning and management policies. On the basis of analysis of the watershed hydrological path and beneficiary populations of its associated ecosystem services, we

基金项目:中国科学院 STS 项目(KFJ-STZ-ZDTP-010)

收稿日期:2018-02-06; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

selected ecosystem service functions (water retention, flood mitigation, water purification, and soil retention) and biodiversity conservation and ecological sensitivity indicators (soil erosion, rocky desertification, and land desertification), and proposed an ecological space planning method at the watershed scale. The results showed that the area of the ecological space in the Yangtze River Basin was  $102.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for 57.42% of the total area of the basin. The forest, shrub, grassland, and wetland accounted for 52.87%, 19.51%, 18.96%, and 4.26% of the total area of the ecological space, respectively. The ecological space of the Yangtze River Basin could conserve 79.47%, 86.99%, 78.09%, 80.60%, and 86.49% of the total amount of the water retention service, flood mitigation service, water purification service, soil retention service, and natural habitat, respectively. On the basis of the ecological space determined by us, the spatial pattern of the ecological conservation redline was analyzed. The area of the ecological conservation redline was  $59.25 \times 10^4 \text{ km}^2$ , accounting for 33.27% of the total area of the basin; the redline areas within the upper reaches, middle reaches, and lower reaches accounted for 59.24%, 38.05%, and 2.71% of the whole redline area, respectively. Our study is not only the basis for ecological space planning of the Yangtze River Basin, ensuring the basin's ecological safety and sustainable development of the economy and society, but also referential for similar ecological space planning of other river basins.

**Key Words:** ecological space; ecological conservation redline; Yangtze River Basin; ecosystem service; beneficiary population

生态系统为人类提供了生存与发展所必需的产品和服务,为人类的生产生活创造了各种条件和惠益<sup>[1]</sup>。千年生态评估表明全球性的生态系统服务功能的持续退化,威胁全球的可持续发展,并强调生态系统服务评估是支撑决策的重要途径<sup>[2]</sup>。自2000年以来,以生态系统服务评估为基础,将生态系统服务评估纳入土地开发决策<sup>[3-8]</sup>、城市土地利用规划<sup>[9-11]</sup>、保护优先区的识别<sup>[12-13]</sup>,以及生态保护政策的制定<sup>[14]</sup>等方面已开展了大量研究,也成为决策者越来越关注的问题<sup>[15-17]</sup>。在我国,为了保障生态安全,优化国土空间开发格局、建设美丽中国,中央提出科学合理布局集约高效的生产空间、宜居适度的生活空间和山清水秀的生态空间,划定并严守生态保护红线,管控重要生态空间。

长期以来,流域开发与管理忽视生态系统提供生态服务的作用<sup>[3]</sup>,导致生态系统退化,提供生态产品与服务的能力下降,流域生态安全形势恶化,严重威胁流域经济社会发展。长江流域是中华民族的摇篮与中国文化发祥地之一,也是我国经济社会发展的重要命脉和重要增长极,以及具有全球意义的生物多样性热点区,在维护国家生态安全上占据重要地位,尤其长江上游是长江流域和我国重要的生态安全屏障区<sup>[18]</sup>。在长江流域范围内确定生态保护的重要区域,划定生态空间和生态保护红线,对于平衡人类活动与生态保护之间的关系,控制开发强度,调整空间结构,具有重要意义。然而,长江流域上、中、下游地形地貌、气候条件分异显著,经济发展不平衡<sup>[19]</sup>,生态系统服务在上下游的分布和受益人口差异显著,研究流域尺度生态空间是协调长江流域发展与生态保护的科学基础。

生态系统服务功能与受益对象之间的空间位置关系的不同,导致人类从生态系统服务中的受益不均等<sup>[20]</sup>。在流域尺度上,生态系统服务功能沿水文路径的受益人口的不同使得其在维护流域生态安全中的重要性不同,需在评估流域生态系统服务功能重要性时考虑上下游关系和服务功能受益人口。本文在考虑流域的水文路径及生态系统服务功能受益人口的基础上,建立长江流域生态空间的规划方法,重点开展长江流域生态系统服务功能重要性格局,及生态敏感性格局分析,划定长江流域生态空间,分析了生态空间范围生态系统产品与服务提供能力,并进一步探讨了长江流域生态保护红线划定方法和范围。本文以长江流域为研究对象,旨在提出一种流域尺度的生态空间和生态保护红线的划定方法,为长江流域大保护提供基础,为其他流域生态空间和生态保护红线规划提供参考。

## 1 方法及资料

生态空间是指以提供生态服务或生态产品为主要目标的国土空间,生态保护红线是指在生态空间范围内

具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域,是保障和维护国家生态安全的底线和生命线,通常包括具有重要水源涵养、生物多样性维护、水土保持、防风固沙等功能的生态功能重要区域,以及水土流失、土地沙化、石漠化、盐渍化等生态环境敏感脆弱区域。

长江流域对保障我国生态安全具有重要意义,根据全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查与评估的结果,长江流域提供了我国39.2%的水源涵养功能,27.5%的洪水调蓄能力,36.3%的水土保持功能和24.9%的自然栖息地。同时,由于长江流域城镇化发展和农业开发,水质问题突出,长江流域生态环境脆弱,面临着较严重的水土流失、石漠化和土地退化等生态问题。长江流域水土流失严重,水土流失面积达57.59万 $\text{km}^2$ ,占全流域面积的32.3%,2010年全流域土壤流失量为10.18亿t,是同期黄河流域的3.5倍。沙化土地面积达5.8%,石漠化土地面积达3.1%<sup>[21]</sup>。

长江流域生态空间规划的基本思路是:以保障长江流域生态安全和提升生态产品与服务能力为目标,以水文及其相关过程为依据,在评估生态服务功能重要性与生态敏感性空间格局的基础上,确定生态空间与生态保护红线范围。生态服务功能重要性的指标包括水源涵养、洪水调蓄、水质净化、水土保持和生物多样性保护,将沿流域水文路径的受益人口作为权重,进行生态功能重要性评估<sup>[4]</sup>,选取水土流失、石漠化和土地沙化的生态问题,进行生态环境敏感性评估,旨在控制这些生态问题,保护这些服务功能。长江流域生态空间及生态保护红线划定的技术路线图如图1所示。

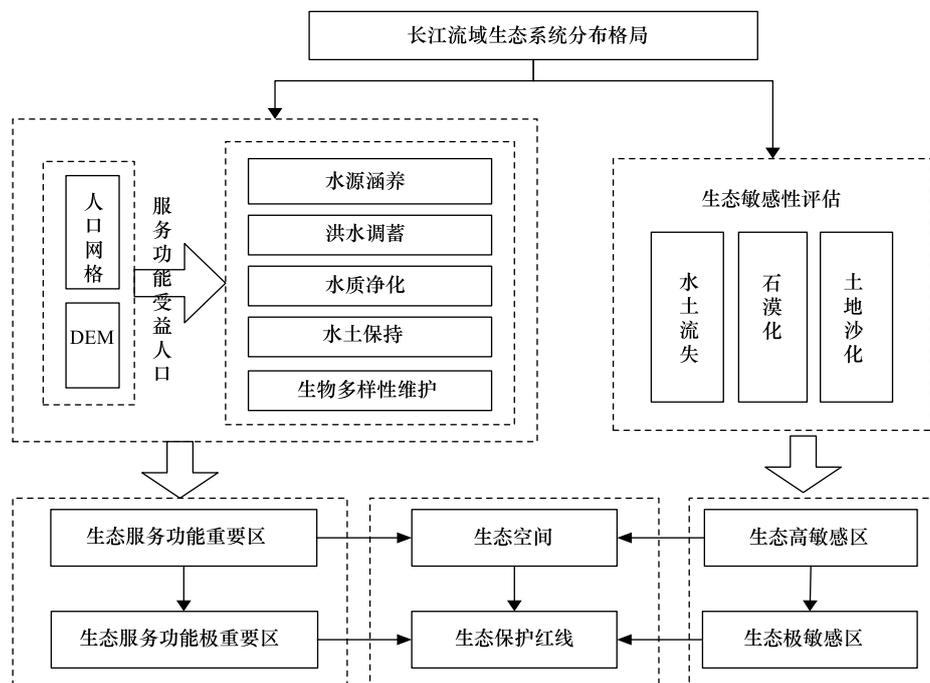


图1 技术路线图

Fig.1 Technical roadmap

## 1.1 生态系统服务功能重要性评估方法

### 1.1.1 生态系统服务功能

水源涵养是生态系统(如森林、草地等)通过其特有的结构与水相互作用,对降水进行截留、渗透、蓄积,并通过蒸散发实现对水流、水循环的调控,主要表现在缓和地表径流、补充地下水、减缓河流流量的季节波动、滞洪补枯、保证水质等方面。本文采用水量平衡方程来计算水源涵养量。水土保持是生态系统(如森林、草地等)通过其结构与过程减少由于水蚀所导致的土壤侵蚀的作用。本文采用修正通用水土流失方程(RUSLE)计算水土保持功能量。水源涵养和水土保持功能的计算方法详见参考文献<sup>[4]</sup>。

洪水调蓄量与暴雨降水量(>50mm)、地表径流量和生态系统类型等因素密切相关。洪水调蓄主要通过

以下方程计算得到:

$$FQ = \sum_{i=1}^j (P_{ri} - R_{ri}) \times A_i \quad (1)$$

式中,  $FQ$  为洪水调蓄量( $\text{m}^3$ );  $P_{ri}$  为暴雨降雨量( $\text{mm}$ );  $R_{ri}$  为暴雨径流量( $\text{mm}$ );  $A_i$  为  $i$  类生态系统的面积。 $i$  为研究区第  $i$  类生态系统类型; $j$  为研究区生态系统类型数(包括森林、灌丛、草地和湿地)。通过查阅 310 篇文献资料关于各类型生态系统径流小区的暴雨降水、地表径流和生态系统类型数据,获得暴雨地表径流与暴雨降雨量的回归函数<sup>[22]</sup>。

采用 InVEST 模型<sup>[23]</sup> 中的营养物输送比率模型<sup>[24]</sup> 计算水质净化功能,估算植被和土壤对径流中营养物的滤除量及输出量。营养物滤除量越大,水质净化功能越强。首先使用 InVEST 模型中的产水模型<sup>[25]</sup> 计算年产量,然后使用年产量、地形数据、生态系统分类图和营养物输出系数估算营养物输出量。估算原理如下:

$$x_{\text{exp}_i} = \text{load}(x, i) \cdot RPI_i \cdot (1 - \text{eff}'_i) \cdot (1 + \exp(\frac{IC_i - IC_0}{k}))^{-1} \quad (2)$$

式中,  $x_{\text{exp}_i}$  为像元  $i$  上某种营养元素  $x$  的输出量,  $\text{load}(x, i)$  为像元  $i$  上的营养元素负荷,  $RPI_i$  为像元  $i$  的径流潜力指数,  $\text{eff}'_i$  为像元与河流之间土地对营养物的最大滞留率,  $IC_i$  为地形指数,  $IC_0$  和  $k$  为校准参数。

生物多样性维护功能通过物种丰富度指标反映,主要以国家一、二级保护物种和其他具有重要保护价值的物种(含旗舰物种)作为生物多样性保护功能的评估指标。评估方法详见参考文献<sup>[12]</sup>。

### 1.1.2 服务功能重要性分级方法

首先,将下游的受益人口作为权重,对生态系统服务功能量进行加权计算,作为服务功能重要性指数<sup>[4]</sup>。具体计算方法为:将 DEM 和人口网格数据作为输入,采用 ArcGIS 10.3 中的水文分析工具,计算每个像元从下游到上游的水流路径上的累积人口数,影响区域即为从上游像元获得生态系统服务的下游流域区域。生物多样性维护功能所提供的自然栖息地对全流域受益,故各栅格权重相同。

对每种服务功能,按重要性指数降序排列,分别将累积服务功能量占前 30% 和前 75% 的像元归类为极重要区域和重要区域,形成各服务功能极重要区和重要区。

### 1.2 生态环境敏感性评估方法

采用通用水土流失方程评估土壤侵蚀量<sup>[26]</sup>。采用水蚀强度指标评价土壤侵蚀强度,分级标准采用水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007》。其中,适用于长江流域所包含的水蚀区(主要是南方红壤丘陵区 and 西南土石山区)的评价标准见表 1。

根据土地覆被资料和风蚀资料,确定潜在沙化区域和沙漠/戈壁的范围,然后根据植被区划分布情况和 NDVI 进一步精细化土地沙化区域。结合区域气候类型和植被覆盖度进行沙化程度分级,沙化土地范围以及土地沙化敏感性分级方法详见参考文献<sup>[27]</sup>。

石漠化敏感性评估是为了识别容易产生石漠化的区域,评估石漠化对人类活动的敏感程度。根据岩性、土地覆盖类型、坡度、植被覆盖度等因素的综合特征划分石漠化敏感性程度,分为不敏感、低敏感、中敏感、高敏感与极敏感 5 个等级,分级标准如表 2 所示。

表 1 土壤侵蚀强度分级标准表

Table 1 Classification of soil erosion intensity

级别 Levels	微度 Mired	轻度 Mild	中度 Moderate	重度 Severe	极重度 Extremely severe
平均侵蚀模数 Average erosion modulus / ( $\text{t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	<500	500—2500	2500—5000	5000—15000	>15000

表 2 石漠化敏感程度等级划分表

Table 2 Classification of sensitivity of rocky desertification

石漠化等级 Levels	坡度 Slope	植被覆盖度/% Vegetation coverage	岩性 Lithology
不敏感 Insensitive	< 5	> 75	埋藏性碳酸岩
低敏感 Lowly sensitive	5—15	35—50	次不纯碳酸岩
中敏感 Moderately sensitive	15—30	20—35	不纯碳酸岩
高敏感 Highly sensitive	30—45	10—20	白云岩
极敏感 Extremely sensitive	> 45	< 10	灰岩与白云岩

### 1.3 生态空间、生态保护红线综合及保护效果评价

合并服务功能重要区和生态高敏感区,得到生态空间评价识别区范围。合并服务功能极重要区和生态极敏感区,得到生态保护红线评价识别区范围。添加长江流域的重要湿地,冰川区,扣除城镇用地、农田和裸土。为减小划定结果的破碎化程度,将面积小于 1 km<sup>2</sup>的孤立斑块扣除。

分析长江流域生态空间和生态保护红线的空间分布格局。分析生态空间和生态保护红线内各自然生态系统面积及比例,计算各生态系统服务功能的保护比例,及其在上、中、下游的分布。将生态保护红线与现行重点生态功能区进行空间叠加分析,分析重点生态功能区对生态保护红线的保护比例,以及保护空缺。

### 1.4 数据来源

本文所使用数据及其来源如表 3 所示。

表 3 数据精度及来源

Table 3 Data accuracy and sources

数据清单 Data list	精度 Accuracy	来源 Sources
2015 年生态系统分类图 Map of Ecosystems of 2015	30 m	中国生态系统评估与生态安全数据库 ( <a href="http://www.ecosystem.csdb.cn/">http://www.ecosystem.csdb.cn/</a> )
2015 年植被覆盖度 Vegetation coverage	250 m	中国生态系统评估与生态安全数据库 ( <a href="http://www.ecosystem.csdb.cn/">http://www.ecosystem.csdb.cn/</a> )
数字高程模型 Digital elevation model	90 m	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )
土壤属性数据 Soil property	1 km	寒区旱区科学数据中心
土壤深度数据 Soil depth	1 km	世界土壤数据库
降雨侵蚀力 Rainfall erosivity	气象站点	北京师范大学
太阳辐射 Solar radiation	1 km	寒区旱区科学数据中心
降雨、气温 Precipitation, temperature	0.05°	中国气象局
蒸散发、风速 Evapotranspiration, wind speed	1 km	中国科学院地理科学与资源研究所
归一化植被指数 Normalized differential vegetation index	250 m	中国科学院遥感与数字地球研究所
气候干燥度 Climatic aridity	500 m	中国科学院地理科学与资源研究所
2015 年生态系统生物量 Biomass	250 m	中国生态系统评估与生态安全数据库 ( <a href="http://www.ecosystem.csdb.cn/">http://www.ecosystem.csdb.cn/</a> )
2015 年人口网格数据 Population grid data	3 km	中国生态系统评估与生态安全数据库 ( <a href="http://www.ecosystem.csdb.cn/">http://www.ecosystem.csdb.cn/</a> )

## 2 结果

### 2.1 长江流域生态系统服务及生态敏感性空间分布

考虑生态系统服务功能的受益人口之后,对维护长江流域的生态安全具有重要作用的生态系统服务具有明显空间异质性(图 2),其中,凉山、岷山、邛崃山、米仓山-大巴山等地分布有重要的水土保持功能、水源涵养功能和生物多样性维护功能;罗霄山和雪峰山等地分布有重要的水土保持功能、水源涵养功能和洪水调蓄功能;川西南山地、川滇干热河谷、川东丘陵、山峡库区等地具有较高的水土保持功能和水质净化功能;此外,渝

东南山区、大娄山区等地的水质净化功能,鄂西南、洞庭湖等地的水源涵养功能,以及滇西北的生物多样性维护功能也较高。

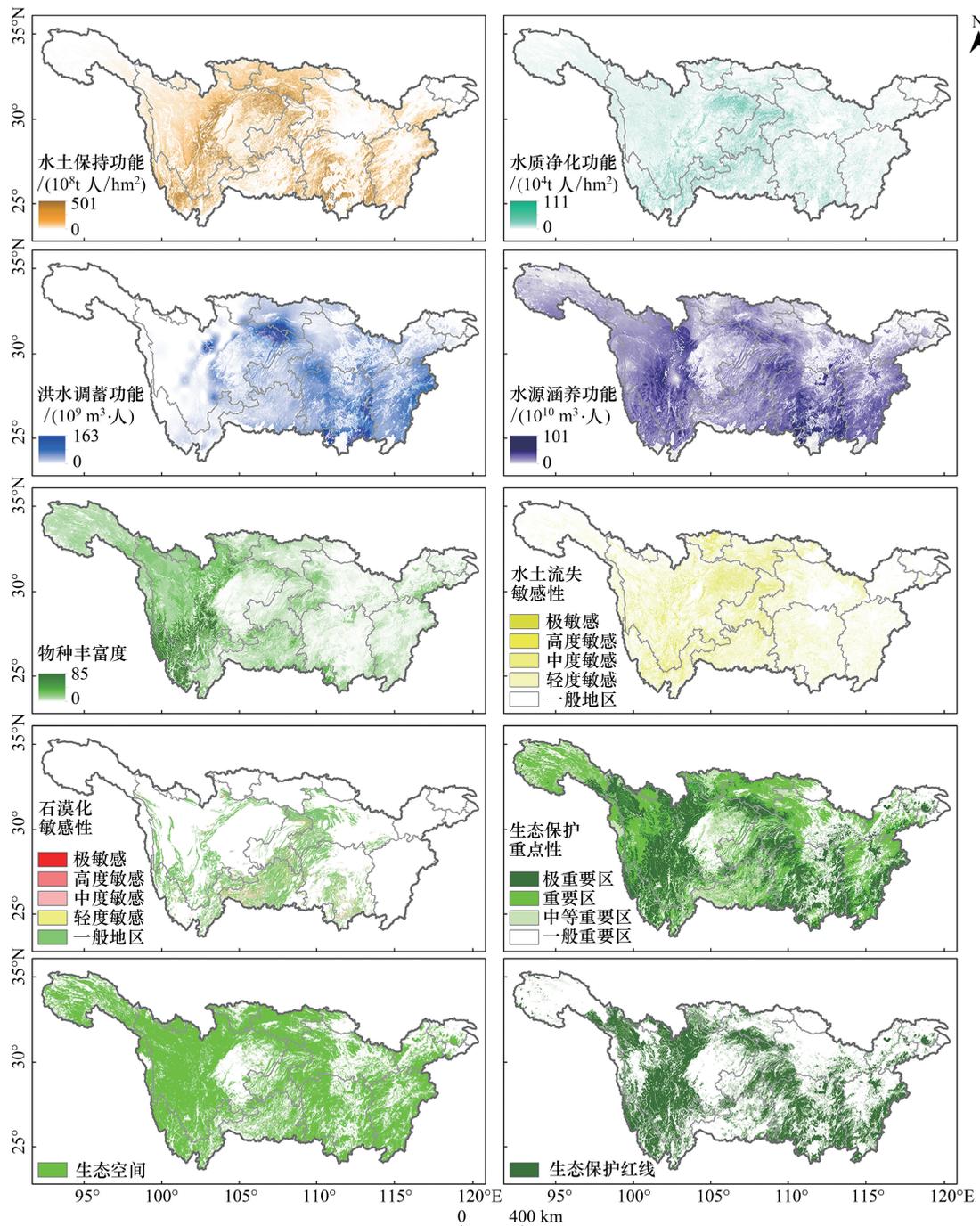


图2 长江流域生态系统服务功能(考虑受益人口)、生态敏感性、及生态空间与生态保护红线图

Fig.2 Mapping of ecosystem services (considering the beneficiary population), ecological sensitivity, ecological space and ecological conservation redline

## 2.2 长江流域生态空间及生态保护红线

长江流域生态空间总面积为 102.25 万  $\text{km}^2$ , 占长江流域总面积的 57.42% (图 2)。其中, 长江流域生态保护红线面积为 59.25 万  $\text{km}^2$ , 占长江流域总面积的 33.27%。长江流域上游生态空间和生态保护红线面积最大, 面积分别为 60.43  $\text{km}^2$  和 35.08 万  $\text{km}^2$ , 主要分布于长江源头区、川西北、岷山、邛崃山、凉山、川西南山地、

川滇干热河谷、秦岭、米仓山-大巴山和大娄山区等;长江流域中游生态空间和生态保护红线面积分别为 38.30 万 km<sup>2</sup>和 22.53 万 km<sup>2</sup>,主要分布于鄂西南、武陵山地、雪峰山、都庞岭-萌渚岭、罗霄山、幕阜山、九连山、洞庭湖、鄱阳湖、赣江上游和浙闽山地等;长江流域下游生态空间和生态保护红线面积分别为 3.49 万 km<sup>2</sup>和 1.60 万 km<sup>2</sup>,主要分布于天目山-怀玉山、皖江湿地、太湖和巢湖等地。

### 2.3 生态空间及生态保护红线的保护效果

长江流域生态空间及生态保护红线内森林、灌丛和草地面积最大(表 4)。就生态系统服务功能保护比例来看,长江流域生态空间保护了 79.47%的水源涵养功能,86.99%的洪水调蓄功能,78.09%的水质净化功能,80.60%的水土保持功能,以及 86.49%的自然栖息地。其中,长江流域生态保护红线保护了 59.27%的水源涵养功能,62.25%的洪水调蓄功能,64.88%的水质净化功能,62.89%的水土保持功能和 55.55%的自然栖息地(图 3)。

表 4 长江流域生态空间及生态保护红线内的生态系统组成

Table 4 Compositions of ecosystems in the ecological space and conservation redline area

生态系统类型 Ecosystem types	生态空间 Ecological space		生态保护红线 Ecological conservation redline	
	面积 Area/(万 km <sup>2</sup> )	比例 Percent/%	面积 Area/(万 km <sup>2</sup> )	比例 Percent/%
森林 Forest	54.04	52.87	34.13	57.60
灌丛 Shrub	19.95	19.51	10.98	18.54
草地 Grassland	19.38	18.96	7.08	11.95
湿地 Wetland	4.36	4.26	3.21	5.41

将考虑受益人口的方法与不考虑受益人口的方法进行比较,考虑受益人口后,生态保护红线内的生态系统服务功能保护比例提高,且生态保护红线内的生态系统服务功能从下游向服务功能受益人口更多的中上游转移(图 3)。与不考虑受益人口相比,水源涵养功能、洪水调蓄功能、水质净化功能、水土保持功能和自然栖息地的保护比例分别提升了 13.0%,12.8%,9.5%,9.6%和 6.5%。考虑受益人口之后,长江流域上游的生态保护红线范围保护了 32.51%的水源涵养功能,17.77%的洪水调蓄功能,54.67%的水质净化功能,37.95%的水土保持功能和 35.30%的自然栖息地;中游保护了 26.12%的水源涵养功能,43.35%的洪水调蓄功能,10.05%的水质净化功能,24.30%的水土保持功能和 19.26%的自然栖息地。水源涵养功能在上游和中游的保护比例分别提升了 3.7%和 9.5%,洪水调蓄功能在上游和中游的保护比例分别提升了 2.1%和 11.3%,水质净化功能在上游和中游的保护比例分别提升了 6.2%和 3.4%,水土保持功能在上游和中游的保护比例分别提升了 5.1%和 4.9%,自然栖息地在上游和中游的保护比例分别提升了 3.3%和 3.7%。

将生态保护红线范围与现行重点生态功能区范围做比较:69.13%的生态保护红线落在重点生态功能区范围内。仍有 30.87%的生态保护红线范围分布于现行重点生态功能区之外,这部分区域提供了生态保护红线内 23.57%的水源涵养功能,35.96%的洪水调蓄功能,24.25%的水质净化功能,22.61%的水土保持功能,以及 21.54%的自然栖息地。这些区域主要分布于湖南省、江西省、贵州省、四川省南部及长江流域下游湿地区。

### 3 讨论

本文基于流域水文路径分析和与其关联的生态系统服务的受益人口,提出一种流域尺度的生态空间及生态保护红线的划定方法。本文选择对维护长江流域生态安全具有重要作用的生态系统服务指标和长江流域典型的生态敏感性指标,通过生态重要性和敏感性评估,划定长江流域生态空间及生态保护红线范围,并与传统的区域生态重要性划分方法进行比较。分析了长江流域生态空间与生态保护红线的空间分布特征和保护效果,指出了现行重点生态功能区的保护空缺。与不考虑服务功能受益人口的划定方法相比,本文提出的流域尺度的生态空间及生态保护红线划定方法考虑流域水文过程及流域生态系统服务功能沿水文路径的受益人口,更恰当的反映了流域生态系统服务功能重要性的空间分布,得出更加合理的生态空间及生态保护红线

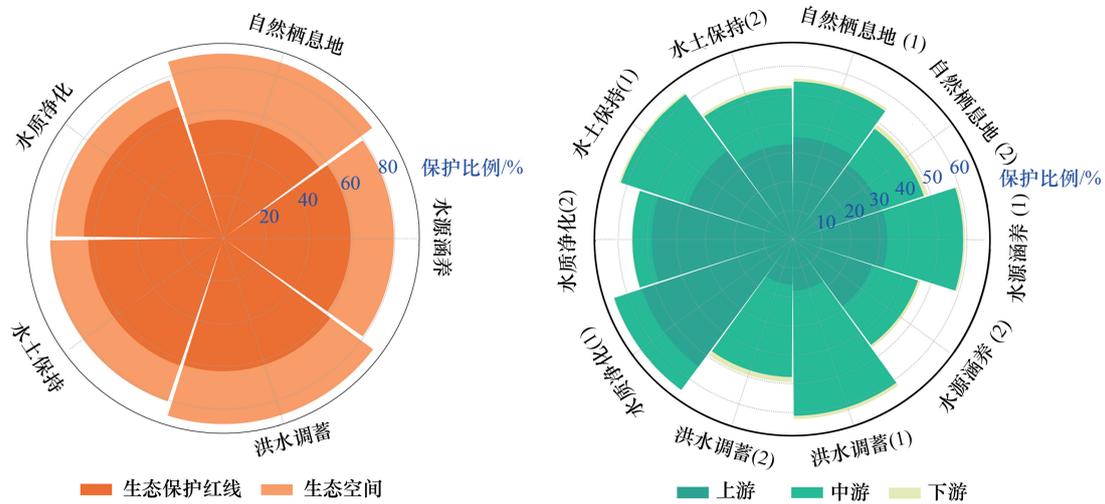


图3 长江流域生态空间与生态保护红线服务功能保护比例

Fig.3 Ecosystem service conservation rates of ecological space and ecological conservation redline

(1)生态空间与生态保护红线的服务功能保护比例;(2)两种方案下生态保护红线在上、中、下游的服务功能保护比例(其中(1)表示考虑受益人口,(2)表示不考虑受益人口)

的空间格局。

生态系统服务功能空间位置的不同,决定了人们从生态系统服务中得到的好处是不均等的<sup>[20]</sup>,在确定生态重要区时如果仅将服务功能量的大小作为生态重要性划分的唯一标准,会导致不公平的产生。考虑受益人口后,生态保护红线内的生态系统服务功能保护比例提高,且生态保护红线内的生态系统服务功能从下游向服务功能受益人口更多的中上游转移,因此是一种更适用于流域尺度的生态重要区的划定方法。

长江流域上游地貌类型多样、气候条件复杂,既是生物多样性富集区,也是生态脆弱区和敏感区<sup>[28]</sup>。在长江上游,生态空间和生态保护红线内生态系统服务功能总量高,受益人口最多,生态空间和生态保护红线分布面积最大,分别达到 59.1%和 59.2%,同时,上游地区资源开发、水利水电建设与生态保护冲突剧烈<sup>[29]</sup>。长江流域中下游生态空间和生态保护红线面积分别占比 40.9%和 40.8%,其中中游生态保护红线内的洪水调蓄服务功能比例最高,然而,长江中下游的湖泊围垦和淤积萎缩导致洪旱灾害频繁发生,城镇化和农业开发频繁挤占生态空间。因此,需协调开发与保护之间的矛盾,同时兼顾统筹考虑长江流域上、中、下游的特点,注重区域间生态保护和经济社会发展的整体性和协调性<sup>[29]</sup>。应完善生态补偿制度,建立流域上下游地区之间、受益地区与保护地区之间、开发地区与保护地区之间的横向生态补偿机制,同时建立受益地区与保护地区之间横向转移支付的生态补偿制度<sup>[30]</sup>。

生态保护红线是在主体功能区规划指导下实施生态空间保护和管控的具体化,也是主体功能区规划的基本要求<sup>[31]</sup>。在长江流域,我国现行重点生态功能区范围已覆盖了 69.13%的生态保护红线范围,重点生态功能区与生态保护红线的空间分布基本一致。因此,本文对长江流域生态保护红线的划定有利于贯彻落实主体功能区制度。然而,仍有 30.87%的生态保护极重要区或生态极敏感区落在重点生态功能区之外,且这些区域提供的生态服务功能比例较高,因此,现行重点生态功能区范围还需进一步扩大和完善。

本文对长江流域生态空间和生态保护红线的划定是基于在长江流域宏观尺度上对上、中、下游生态功能重要性和生态敏感性的综合评估,确定了长江流域生态空间和生态保护红线的基本格局。如何在保护成本和保护效果上进行权衡,综合考虑自然生态系统层次性、完整性,以当地空间发展规划、禁止开发区、保护地分布、生态公益林分布为补充,结合当地主要经济社会活动、主要生态问题、土地权属与管理责任主体等信息,合理确定生态空间和生态保护红线实地边界,是生态空间和生态保护红线划定中需要实际考虑的问题。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [ 2 ] Millennium Ecosystem Assessment (MEA). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington DC: Island Press, 2005.
- [ 3 ] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, Watson R T, Abson D J, Andrews B, Binner A, Crowe A, Day B H, Dugdale S, Fezzi C, Foden J, Hadley D, Haines-Young R, Hulme M, Kontoleon A, Lovett A A, Munday P, Pascual U, Paterson J, Perino G, Sen A, Siriwardena G, van Soest D, Termansen M. Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
- [ 4 ] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [ 5 ] Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice I C, Araújo M B, Arnell N W, Bondeau H, Carter T R, Gracia C A, de la Vega-Leinert A C, Erhard M, Ewert F, Glendining M, House J I, Kankaanpää S, Klein R J T, Lavorel S, Lindner M, Metzger M J, Meyer J, Mitchell T D, Reginster I, Rounsevell M, Sabaté S, Sitch S, Smith B, Smith J, Smith P, Sykes M T, Thonicke K, Thuiller W, Tuck G, Zaehle S, Zierl B. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 2005, 310(5752): 1333-1337.
- [ 6 ] Lawler J J, Lewis D J, Nelson E, Plantinga A J, Polasky S, Withey J C, Helmers D P, Martinuzzi S, Pennington D, Radeloff V C. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(20): 7492-7497.
- [ 7 ] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, Kareiva P M, Mooney H A, Pejchar L, Ricketts T H, Salzman J, Shallenberger R. Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 21-28.
- [ 8 ] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [ 9 ] Li T H, Li W K, Qian Z H. Variations in ecosystem service value in response to land use changes in Shenzhen. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1427-1435.
- [ 10 ] 黎斌, 何建华, 屈赛, 黄俊龙, 李一挥. 基于贝叶斯网络的城市生态红线划定方法. *生态学报*, 2018, 38(3): 800-811.
- [ 11 ] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨畅, 彭建. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例. *生态学报*, 2017, 37(24): 8241-8253.
- [ 12 ] Xu W H, Xiao Y, Zhang J J, Yang W, Zhang L, Hull V, Wang Z, Zheng H, Liu J G, Polasky S, Jiang L, Xiao Y, Shi X W, Rao E M, Lu F, Wang X K, Daily G C, Ouyang Z Y. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(7): 1601-1606.
- [ 13 ] Durán A P, Casalegno S, Marquet P A, Gaston K J. Representation of ecosystem services by terrestrial protected areas: Chile as a case study. *PLoS One*, 2013, 8(12): e82643.
- [ 14 ] Zheng H, Robinson B E, Liang Y C, Polasky S, Ma D C, Wang F C, Ruckelshaus M, Ouyang Z Y, Daily G C. Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(41): 16681-16686.
- [ 15 ] Bagstad K J, Semmens D J, Waage S, Winthrop R. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 2013, 5: 27-39.
- [ 16 ] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [ 17 ] Maes J, Egoh B, Willemsen L, Liqueste C, Vihervaara P, Schägner J P, Grizzetti B, Drakou E G, Notte A L, Zulian G, Bouraoui F, Paracchini M L, Braat L, Bidoglio G. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 31-39.
- [ 18 ] 陈国阶. 对建设长江上游生态屏障的探讨. *山地学报*, 2002, 20(5): 536-541.
- [ 19 ] 虞孝感. 长江流域生态安全问题及建议. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 294-298.
- [ 20 ] Mandle L, Tallis H, Sotomayor L, Vogl A L. Who loses? Tracking ecosystem service redistribution from road development and mitigation in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2015, 13(6): 309-315.
- [ 21 ] 欧阳志云, 王桥, 郑华, 张峰, 侯鹏. 全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查与评估. 北京: 科学出版社, 2014.
- [ 22 ] Kong L Q, Zheng H, Xiao Y, Ouyang Z Y, Li C, Zhang J J, Huang B B. Mapping ecosystem service bundles to detect distinct types of multifunctionality within the diverse landscape of the Yangtze River Basin, China. *Sustainability*, 2018, 10(3): 857.

- [23] Kareiva P, Tallis H, Ricketts T H, Daily G C, Polasky S. Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services. New York: Oxford University Press, 2011.
- [24] Natural Capital Project. InVEST + VERSION + documentation. [2018-02-06]. <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/ndr.html>.
- [25] Natural Capital Project. InVEST + VERSION + documentation. [2018-02-06]. <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html/reservoirhydropowerproduction.html>.
- [26] Rao E M, Ouyang Z Y, Yu X X, Xiao Y. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China. *Geomorphology*, 2014, 207: 64-70.
- [27] 晁雪林. 京津风沙源治理区近 10 年沙化土地动态变化研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [28] 杨桂山, 徐昔保, 李平星. 长江经济带绿色生态廊道建设研究. *地理科学进展*, 2015, 34(11): 1356-1367.
- [29] 高吉喜. 划定生态保护红线, 推进长江经济带大保护. *环境保护*, 2016, 44(15): 21-24.
- [30] 郑华, 欧阳志云. 生态红线的实践与思考. *中国科学院院刊*, 2014, 29(4): 457-461, 448-448.
- [31] 燕守广, 林乃峰, 沈渭寿. 江苏省生态红线区域划分与保护. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(3): 294-299.