

# 汉江流域水源涵养功能的关键生态修复区 识别与植被优化配置

白淑英, 吴梦珂, 于烨婷

(南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** [目的] 识别汉江流域水源涵养关键生态修复区, 进行植被优化配置和生态修复效果的验证, 为生态修复工程实施范围提供科学依据。[方法] 主要利用 InVEST 模型, 估算 2020 年水源涵养量, 通过水源涵养功能强弱识别关键生态修复区, 将水源涵养弱功能区内有林地、灌木林、草地、未利用地和 25° 坡以上的耕地区域作为修复区, 对修复区进行林地适宜性评价, 依据林地适宜性评价结果完成各土地覆盖类型之间的优化配置, 模拟完成配置后修复区的水源涵养功能, 并与配置前进行比较。[结果] 植被优化配置后, 修复区产水量降低了 6.97%, 水源涵养总量提高了 14.96%。[结论] 汉江流域通过植被优化配置手段提升水源涵养功能具有一定的潜力, 未来应在水源涵养功能的基础上同时考虑其他生态服务功能, 进行汉江流域修复区识别, 以便采取更全面的修复措施来解决汉江流域的生态问题。

**关键词:** 水源涵养功能; InVEST 模型; 生态修复区识别; 植被优化配置; 汉江流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)03-0123-06

中图分类号: X171.1, F301.2

**文献参数:** 白淑英, 吴梦珂, 于烨婷. 汉江流域水源涵养功能的关键生态修复区识别与植被优化配置[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 123-128. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.016; Bai Shuying, Wu Mengke, Yu Yeting. Identification of key ecological restoration areas and optimal allocation of vegetation for water conservation in Hanjiang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 123-128.

## Identification of Key Ecological Restoration Areas and Optimal Allocation of Vegetation for Water Conservation in Hanjiang River Basin

Bai Shuying, Wu Mengke, Yu Yeting

(School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing

University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract:** [Objective] The key ecological restoration areas for water conservation in the Hanjiang River basin were identified, and the allocation of vegetation was optimized, and to verify the effects of ecological restoration was verified in order to provide a scientific basis for the implementation of ecological restoration projects. [Methods] The InVEST model was used to estimate the water conservation amount in 2020, and the key ecological restoration areas were identified according to the strength of the water conservation function. The ecological restoration scope was defined as the area with forest land, shrub forest, grassland, unused land, and cultivated land with slopes greater than 25° in the weak water conservation function area. A forest land suitability evaluation was carried out at the restoration area. The optimal configuration between land cover types was simulated, and the water conservation function of the restoration area after the configuration and completed was compared with the water conservation function before the configuration. [Results] Water production in the restoration area decreased by 6.97% after the optimal allocation of vegetation, and the total amount of water conservation increased by 14.96%. [Conclusion] The Hanjiang River basin has potential to improve water conservation by means of vegetation optimization allocation. In the future, the restoration area of the Hanjiang River basin should be identified by considering other ecological service functions on the basis

收稿日期: 2022-08-28

修回日期: 2022-09-20

资助项目: 国家重点研发计划资助“生态系统要素遥感诊断与风险评估技术研究”(2021YFB3901104)

第一作者: 白淑英(1973—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区宁城县人, 博士, 副教授, 从事遥感与地理信息系统在生态环境中的应用研究。

Email: baishu-ying@163.com

of water conservation, and more comprehensive restoration measures should be taken to solve the ecological problems of the Hanjiang River basin.

**Keywords:** water conservation function; InVEST model; identification for ecological remediation; optimal allocation of vegetation; Hanjiang River basin

生态修复是通过自然和人为手段使退化、破坏或损毁的生态系统恢复的过程,是构建生态安全格局的主要途径<sup>[1]</sup>。2019年3月,联合国“环境规划署”指出土地破坏和退化是全球普遍存在的生态退化现象<sup>[2]</sup>,生态修复是维持生态系统结构和过程的完整性,改善研究区整体生态环境的关键。党的十九大报告进一步明确要加大实施重要生态系统保护修复重大工程<sup>[3]</sup>。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出将生态修复作为国家战略工程,生态修复已经成为实现国家生态文明建设的重要途径和手段。

近年来,国内外生态修复相关研究主要集中在生态系统类型和生态系统功能的修复两个方面。如针对有林地<sup>[4]</sup>、草地<sup>[5]</sup>、矿山<sup>[6]</sup>、农田等<sup>[7]</sup>单一生态系统类型的生态修复研究和实践。生态功能修复方面主要有基于生物多样性维护<sup>[8]</sup>、水土保持<sup>[9]</sup>、防风固沙<sup>[10]</sup>和水源涵养等<sup>[11]</sup>功能的生态修复。

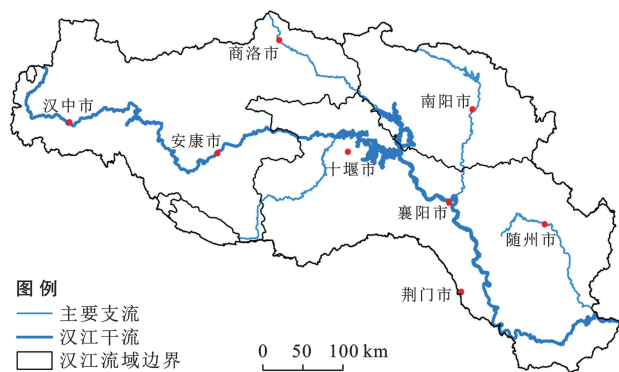
生态修复区识别起源于俄国学者 Dokuchaev 提出的生态区<sup>[12]</sup>,国内外学者早期的主要关注点在生态修复范围、采煤塌陷区修复等方面。目前从生态系统服务功能方面开展生态修复区识别研究<sup>[13-14]</sup>,主要进行生态修复关键区域的识别、生态修复策略等<sup>[15]</sup>。生态修复分区<sup>[16-18]</sup>及修复区识别<sup>[19]</sup>,包括保育保护、自然恢复、辅助修复与生态重建等。生态修复的最终目标是提升生态系统的生态服务功能。其中,水源涵养功能是最重要的生态服务功能,是带动提升其他生态功能,使生态系统呈现良性循环的核心和关键。在无法全面实施整个流域的生态修复工程的情况下,迫切需要精确定位能够提升水源涵养功能的生态修复工程实施范围,明确哪些区域实施生态修复工程能最有效的提高生态服务功能?通过什么途径实现生态修复目标?生态修复工程的效果如何等是亟需解决的问题。

目前对于修复区的划定以及修复区内需要实施什么生态工程措施,生态修复效果如何等研究还相对薄弱。生态修复区识别和植被优化配置对于提高生态服务功能同等重要,针对生态修复区进行林地适宜性评价,根据评价结果进行植被优化配置,是科学合理地提升生态服务功能的有效措施。本研究依据水源涵养功能强弱识别关键生态修复区,根据修复区内林地适宜性等级进行植被优化配置,并从流域产流、

河流径流、水源涵养量方面进行生态修复效果的验证。研究将为汉江流域生态修复工程实施范围提供科学依据。

## 1 研究区概况

汉江位于(陕西、河南、湖北3省部分区域)106°12′—114°35′E,30°06′—34°23′N(图1),汉江流域总面积达 $1.75 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,占长江流域面积的9.2%,其干流全长1577 km,落差1964 m,流域内分布着大量的山脉、且山峰陡峭。流域多年平均径流量为 $5.91 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,径流深371.7 mm,较全国平均径流水平高。流域内的植被类型主要为亚热带常绿阔叶林、常绿阔叶林和落叶阔叶混交林,植被覆盖度较高。汉江属于亚热带季风气候区,季风对区域影响较大,年平均降水量为800~1200 mm,集中分布在夏秋两季,流域面积大,支流众多,水量大,经常受到洪涝灾害的威胁,成为长江流域防洪的重点,因此,作为洪水调蓄的重要途径,其水源涵养功能的提升尤为重要。



注:本图源于地理遥感生态网科学数据注册与出版系统和中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云,并基于自然资源部标准地图服务系统GS(2020)4632号标准地图图例制作。下同。

图1 汉江流域地理位置图

Fig.1 Geographical location map of Hanjiang River basin

## 2 数据源及研究方法

### 2.1 数据源

(1) DEM数据。DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。用于地形指数、海拔、坡向、坡度的计算。

(2) 水资源量数据。汉江流域2020年地表水资源量、地下水资源量、水资源总量数据,来源于《2020

年长江及西南诸河水资源公报》。主要用于 InVEST 模型产水量模拟结果的精度验证。

(3) 气象数据。降雨数据根据时间长、站点多的原则,选取 1961—2020 年汉江流域周边 50 个气象站的逐日降水量资料,来源于中国气象科学数据共享服务网提供的“中国地面气候资料日值数据集”(http://www.cma.gov.cn/2011 qxfw/2011 qsjgx/)。

(4) 土地覆盖类型数据。2020 年土地覆盖类型数据,空间分辨率 30 m,来源于全球地理信息公共产品(http://www.globallandcover.com/)。

(5) 土壤数据。主要用于土壤可利用含水量、土层深度、土壤饱和导水率的计算,来源于世界土壤数据库(http://westdc.westgis.ac.cn/)。

(6) 潜在蒸散量。潜在蒸散量数据的空间分辨率为 30 arc seconds(约 1 km),其潜在蒸散量是根据 World Clim 全球气象数据库中的气象数据,采用 Modified Hargreaves 方法进行计算得到。数据来自全球干旱和潜在蒸散发数据库(global aridity and PET database)。

(7) NPP(林地净第一性生产力)数据。2020 年 NPP 数据,分辨率为 500 m,主要用于林地适应性评价中各因子等级划分和分值确定。数据来源于 EarthData 中的 LP 数据集(https://search.earthdata.nasa.gov/)。

(8) 数据预处理。对 DEM 数据进行镶嵌、裁剪等处理,采用 ArcGIS 的水文分析功能提取坡度、坡向和地形指数,通过填洼、汇流累积量计算获取河网水系和子流域界线数据。对土地覆盖数据根据 InVEST 模型的需要进行重分类。对逐日气象站点观测数据合成逐年降水、气温、风速等,计算各站点的年平均降水量、年均潜在蒸散量。对气象站的点状数据,采用反距离加权插值生成面状栅格数据,潜在蒸散量数据利用克里金插值进行空间化。从土壤数据中获取土层深度信息,利用 SPAW 工具计算 PAWC(植被可利用含水量)、土壤饱和导水率栅格数据。所有数据均统一转换到 CGCS 2000 坐标系和 Albers 地图投影。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 水源涵养功能估算方法

(1) 产水量的计算。本研究关于产水量的计算主要是通过 InVEST 模型的 Water Yield 模块。该模块原理是:在水量平衡原理的基础上,认定每个栅格的产水量都是通过径流的方式汇聚到流域出水口,将研究区内单个栅格单元内的降水量和蒸散量之差视为产水量<sup>[20]</sup>。

(2) 水源涵养量估算。水源涵养量计算公式为式(1):

$$\text{retention} = \min(1, 249/V) \times \min(1, 0.9 \times I_T/3) \times \min(1, K_{\text{sat}}/300) \quad (1)$$

式中:retention 为水源涵养深度(mm);V 为流速系数,将 USDA-NRCS 提供的流速系数值乘以 1 000 得到;K<sub>sat</sub> 为土壤饱和导水率(cm/d),根据 Neuro Theta 模型计算得到;I<sub>T</sub> 为地形指数,利用 ArcGIS 对 DEM 数据进行空间分析处理获得。

### 2.2.2 生态修复识别及植被空间优化配置

(1) 生态修复区识别。根据《国家生态保护红线生态功能红线划定技术指南(试行)》的 Quantile(分位数)方法,将研究区按照水源涵养功能(mm)由弱到强依次分为弱功能区(0~26.13)、中度功能区(26.13~41.06)、强功能区(>41.06)。本研究将植被优化配置作为主要的生态修复措施,根据《全国 1:100 万土地资源图编图制图规范》,将弱功能区内遭到破坏的有林地、灌木林、草地、未利用地以及 >25° 的坡耕地范围作为最终生态修复区。

(2) 林地适宜性评价。通常有林地的水源涵养功能大于其他植被类型,因此,将降水量、海拔、坡向、坡度、土壤质地、土层厚度、土壤有机质含量 7 项立地条件作为参评因子,对水源涵养弱功能区进行林地适宜性评价,因为土地利用数据为离散类型数据,同一种类型内部是均质的,因此,利用 NPP 数据进行非均质化(如均质的有林地类型内,利用 NPP 数据实现质量差异空间化),保证了适宜性评价的客观性和科学性。利用 NPP 数据和各评价指标之间的相关性,划分因子等级和确定对应的信息量值。利用层次分析法(AHP)确定评价因子的权重,采用综合评价模型进行林地适宜性评价,计算公式为:

$$y = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i \quad (2)$$

式中:y 是林地适宜性评价综合值;x 为各参评因子的得分;ω 为各参评因子的权重;n 是参评因子个数。根据林地适宜性评价综合值,采用自然裂点法,以综合值 70,80,90 为阈值,将水源涵养修复区划分为最适宜区、适宜区、勉强适宜区和不适宜区 4 个等级。

(3) 植被空间优化配置。在植被优化配置中依据水源涵养能力的强弱,依次选择灌木林、草地进行配置。将灌木林、草地、未利用地和 >25° 坡耕地中适宜和最适宜林地的区域配置为有林地,勉强适宜的区域配置成灌木林。海拔高、坡度较大,水土流失严重,土层薄水分少,不适宜林木生长的地区全部配置成草地。

### 3 结果与分析

#### 3.1 模型精度验证和流域产水量模拟结果与分析

本文以《2020 年长江及西南诸河水资源公报》为依据,由公报中公布的地表水资源量、地下水资源量、水资源总量计算得到汉江流域 2020 年的实际产水量为  $7.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。在 InVEST 模型中输入不同的 Z 系数多次进行产水量模拟,将得到的产水量值和实际产水量值做比较,对结果进行校正,最终确定当  $Z = 5.0$  时,模拟结果  $7.04 \times 10^{10} \text{ m}^3$  与实际产水量误差较小,精度较高。

汉江流域平均产水量为 419.62 mm,东南地区主要是农田、建设用地和未利用地,林地较少,故流域东南部地区的产水量普遍高于平均产水量;而西部的大部分地区的产水量基本在 300 mm 以下,普遍低于平均产水量,这是因为西部地区为秦岭山地生态保护区地带,多为山区,地形复杂、植被覆盖率较高。

#### 3.2 水源涵养量计算结果与分析

汉江流域的水源涵养总量为  $1.01 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,平均水源涵养功能为 54.30 mm,由图 2 可知,水源涵养值高的区域主要位于西部和中南部地区,较低的地区主要分布在东北部的冲积平原。

不同土地覆盖类型的水源涵养功能存在明显的差异。有林地和灌木林水源涵养功能最高,平均水源涵养功能分别为 70.83, 66.52 mm;草地的平均水源涵养功能为 61.65 mm,降水落在草地会减缓其下渗速度,进而会以地表径流的形式流失;未利用地、农田的水源涵养功能分别为 45.77, 32.68 mm;平均水源涵养功能最低的是建设用地为 22.28 mm,由于本研究中的湿地大多数为水域范围,其水源涵养功能为 6.72 mm。

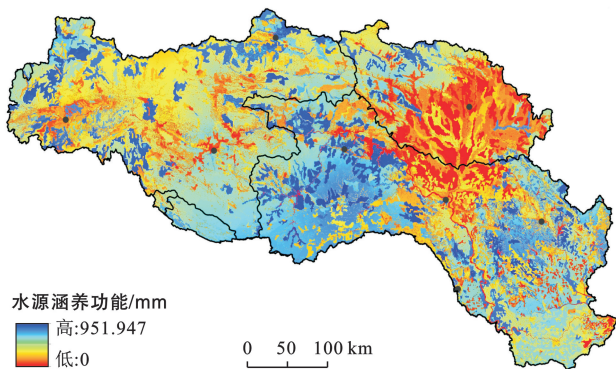


图 2 汉江流域水源涵养功能分布

Fig.2 Distribution of water conservation functions in Hanjiang River basin

汉江流域有林地的水源涵养总量最高,其水源涵养贡献率为 73.0%;其次是农田,为 19.9%;再次是草地,由于汉江流域草地面积仅为总面积的 4.4%,远小于农田,因此其水源涵养贡献率仅为农田的 20%。

平均径流深与平均水源涵养深度之和为平均产水深度,流域内的径流深可以验证水源涵养量精度。由《2020 年长江及西南诸河水资源公报》可知,研究区地表水资源量为  $6.82 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,换算成径流深为 389.95 mm。本研究计算结果,2020 年汉江的平均产水深度为 419.62 mm,水源涵养深度为 54.30 mm,因此本研究计算的平均径流深度为 365.32 mm,相对误差为 6.3%。

#### 3.3 生态修复区识别结果

根据研究区水源涵养功能强弱分区结果(图 3)可以看出,汉江流域水源涵养强功能区占总面积的比例最大,为 35.4%。主要分布在流域上游的北部和南部以及下游的中部区域,该区域内降水充沛,水系发达且植被覆盖度较高,土壤透水性较强,因此涵养水分能力较强。水源涵养中度功能区占 32.8%,主要分布在汉江上游的中部和北部区域。水源涵养弱功能区所占比例最小,主要分布在汉江流域的冲积平原地区,占 31.9%,此区域主要的土地覆盖类型为建设用地、农田,有林地所占面积较少。生态修复区占地面积共  $12\,270 \text{ km}^2$ ,占水源涵养弱功能区的 23.0%,占汉江流域的 7.3%。

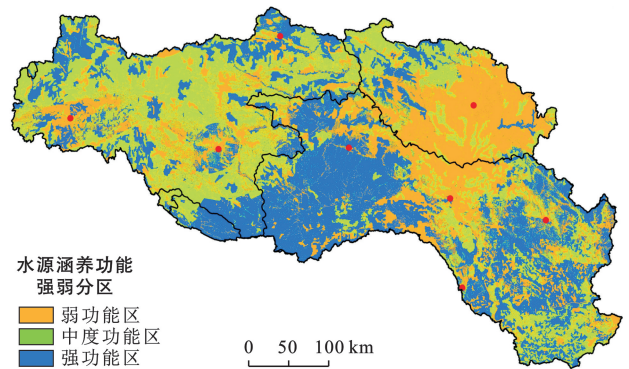


图 3 汉江流域水源涵养功能分区

Fig.3 Functional division of water conservation in Hanjiang River basin

#### 3.4 林地适宜性评价结果

修复区内可以配置为林地的土地(最适宜、适宜、勉强适宜区)占总面积的 64.4%,其中最适宜区占 19.8%,适宜区占 44.5%,勉强适宜区占 27.4%,不适宜区占 8.2%。25°以上坡耕地中有 6.5%适宜配置林地,有林地和灌木林中的 91.9%区域有利于林地生

长,而8.1%的区域由于地形复杂、气象条件不利等因素阻碍林地生长。草地和未利用地共占修复区总面积的12.1%,其中适宜林地的面积占92.8%。说明修复区内以适宜林地类型为主,大部分地区能够通过林地植被配置进行生态修复。

### 3.5 植被空间格局优化配置结果

如表1所示,修复区内有1354.82 km<sup>2</sup>的区域配置成了有林地,有987.46 km<sup>2</sup>的区域配置成了灌木林,有810.17 km<sup>2</sup>的区域配置成了草地。对修复区内土地覆盖类型进行植被优化配置结果见图4。

表1 汉江流域水源涵养区优化配置的土地覆盖转移矩阵

Table 1 Land cover transfer matrix for optimal allocation of water conservation areas in Hanjiang River basin km<sup>2</sup>

土地利用类型	耕地	有林地	灌木林	草地	未利用地
耕地	0	803.17	191.34	14.83	0
有林地	0	8981.02	0	794.24	0
灌木林	0	4.04	0.47	0.03	0
草地	0	544.72	784.34	136.42	0
未利用地	0	2.89	11.78	1.07	0

### 3.6 植被空间优化配置水源涵养功能修复效果检验

修复区内的林地覆盖率(包括有林地和灌木林)

表2 汉江流域水源涵养修复区植被优化配置前后产水量和水源涵养量变化

Table 2 Changes in water yield and water conservation before and after optimal vegetation allocation in water conservation restoration area of Hanjiang River basin

土地覆盖类型	产水量/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	产水功能/ mm	水源涵养量/ 10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	水源涵养 功能/mm	产水量/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	产水功能/ mm	水源涵养量/ 10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	水源涵养 功能/mm
耕地	6.34	429.73	2.39	16.18				
有林地	39.03	313.23	25.8	20.70	39.32	370.79	30.35	28.94
灌木林	0.03	343.42	0.02	21.26	5.11	548.91	3.39	36.66
草地	8.5	403.62	3.91	18.59	5.87	602.81	3.22	33.33
未利用地	0.17	803.34	0.03	16.06				

## 4 结论

(1) 汉江流域2020年产水量总量为 $7.04 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>,其平均产水深度为419.61 mm,水源涵养总量为 $10.11 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,平均水源涵养功能为54.30 mm。通过对Z系数的调整进行模型优化,最终确定当Z=5.0时,模拟结果与《2020年长江及西南诸河水资源公报》的产水量数据误差较小,模型精度符合要求。根据水源涵养功能强弱分区结果确定生态修复区为水源涵养弱功能区内的森林、灌丛、草地、未利用地和坡度在25°以上的耕地。由林地适宜性评价结果可知,修复区内以适宜林地类型为主,适合通过林地配置进行生态修复。

从原来的77.3%增长到84.2%,对植被优化配置后水源涵养功能进行模拟,结果显示(表2)修复区内产水量总量减少了 $3.87 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,修复区内水源涵养总量增加了 $4.54 \times 10^7$  m<sup>3</sup>。其中有林地增加 $4.55 \times 10^7$  m<sup>3</sup>,灌木林增加了 $5.08 \times 10^7$  m<sup>3</sup>。由于大部分草地被配置成了有林地和灌木林,草地减少了 $6.90 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。总之,通过生态修复区植被优化配置后,修复区产水量降低了7.0%,水源涵养总量提高了15.0%,说明通过生态修复提升汉江流域水源涵养功能可行。

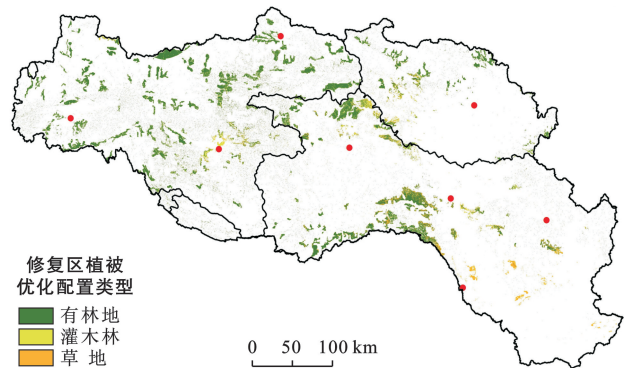


图4 汉江流域水源涵养修复区植被优化配置类型

Fig.4 Vegetation optimal allocation types in water conservation and restoration areas of Hanjiang River basin

(2) 植被优化配置前后对比分析结果显示,修复区内的水源涵养总量明显提高,显示出修复区内的植被经过植被优化配置后水源涵养功能得到提升,说明通过植被优化配置措施来提高汉江流域的水源涵养能力,进而改善汉江流域生态服务功能是可行的。本研究在进行关键生态修复区识别时仅考虑了水源涵养功能这一生态服务功能,因此确定的生态修复区不能完全反映出该区域遭到生态破坏的情况,采取的修复措施也无法发挥出最理想的效果。

因此,未来应在水源涵养功能的基础上同时考虑其他生态服务功能,进行汉江流域修复区识别,进而采取更全面的修复措施来解决汉江流域的生态问题。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 何海珊,赵宇豪,吴健生.低碳导向下土地覆被演变模拟:以深圳市为例[J].生态学报,2021,41(21):8352-8363.
- [2] Waltham N J, Elliott M, Lee S Y, et al. UN Decade on Ecosystem Restoration 2021—2030: What chance for success in restoring coastal ecosystems? [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7; DOI: 10.3389/FMARS.2020.00071.
- [3] 白中科,周伟,王金满,等.试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理[J].中国土地科学,2019,33(2):1-11.
- [4] 赖承义,左舒翟,任引.不同生态修复措施和环境因素对亚热带红壤区针叶纯林坡面水土保持功能的影响[J].生态学报,2021,41(12):4913-4922.
- [5] 武俊喜,潘影,李振男,等.基于 NPP 分配的生产和生态功能协同提升模式:以西藏拉萨河谷半农半牧村为例[J].生态学报,2021,41(11):4596-4605.
- [6] 高俊华,邹联学,龙欢,等.基于遥感动态监测的吉林省矿山地环境及生态修复变化特征分析[J].自然资源遥感,2022,34(3):240-248.
- [7] 包贵萍,梁小亮,梁颖,等.南方红壤丘陵耕地生态修复补偿标准研究[J].资源科学,2019,41(2):247-256.
- [8] 钟胜财,于克锋,厉成伟,等.生态修复后海三棱蔗草湿地底栖生物多样性的年度变化及影响因子[J].长江流域资源与环境,2020,29(4):889-899.
- [9] 李洁,马香玲,任启文.官厅水库上游流域水土保持生态修复分区及实用技术研究[J].中国水土保持,2019(1):32-34.
- [10] 刘硕,李品,冯兆忠.京津冀防风固沙植被生态修复研究进展与对策[J].生态学杂志,2019,38(1):267-274.
- [11] 蔡海生,查东平,张学玲,等.基于主导生态功能的江西省国土空间生态修复分区研究[J].地学前缘,2021,28(4):55-69.
- [12] 刘春芳,李鹏杰,刘立程,等.西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区[J].农业工程学报,2020,36(17):254-263.
- [13] Jones H P, Schmitz O J. Rapid recovery of damaged ecosystems [J]. *PLoS One*, 2009, 4(5):e5653.
- [14] Helmer M, Lipton J, Snitker G, et al. Mapping heritage ecosystem services in ecological restoration areas: A case study from the East Cascades, Washington [J]. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 2020, 31:100314.
- [15] 方莹,王静,黄隆杨,等.基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别:以烟台市为例[J].自然资源学报,2020,35(1):190-203.
- [16] 马世发,劳春华,江海燕.基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟:以粤港澳大湾区为例[J].生态学报,2021,41(9):3441-3448.
- [17] 冯伟,丛佩娟,袁普金,等.全国水土保持生态修复类型分区研究[J].水土保持通报,2009,29(5):216-218.
- [18] 岳文泽,侯丽,夏皓轩,等.基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J].应用生态学报,2022,33(1):149-158.
- [19] 王文静,逯非,欧阳志云.国土空间生态修复与保护空间识别:以北京市为例[J].生态学报,2022,42(6):2074-2085.
- [20] 孙小银,郭洪伟,廉丽妹,等.南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析[J].自然资源学报,2017,32(4):669-679.
- [30] 冯子钰,施润和.中国近地面 PM<sub>2.5</sub> 浓度与排放的时空分布及其关联分析[J].地球信息科学学报,2021,23(7):1221-1230.
- [31] 左妍,周勇,李晴,等.鄂西南地区土地利用格局时空变化及轨迹特征分析[J].水土保持学报,2022,36(1):161-169.
- [32] 张东.乌鲁木齐市夜间灯光分布及城市重心迁移特征研究[J].新疆师范大学学报(自然科学版),2021,40(2):29-34.
- [33] 伊木然江·阿卜来提,张永福,孜比布拉·司马义.基于 GlobeLand 30 的哈密市 2000—2020 年土地利用格局变化研究[J].水土保持通报,2021,41(1):182-189.
- [34] 李颀,郑步云,王劲峰.2008—2018 年中国手足口病时空分异特征[J].地球信息科学学报,2021,23(3):419-430.
- [35] 夏利恒,刘京,尉芳,等.陕西渭北旱塬区耕地时空格局变化分析[J].农业工程学报,2021,37(5):256-264.
- [36] 葛岂序,刘岩,杨洪,等.2015—2019 年河南省 PM<sub>2.5</sub> 时空特征与驱动因素分析[J].环境科学,2022,43(4):1697-1705.
- [37] 王佳玉,姜同仁.中国体育产业专利创新的时空演变特征研究[J].山东体育学院学报,2021,37(3):41-49.
- [38] 李光强,曾绍琴,邓敏,等.重心转移曲线在时空演化模式表达中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2013,38(8):940-944.
- [39] 朱敏,王翔坤,姚林,等.面向城市空间热点分析的可视化方法综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2020,32(4):551-567.
- [40] 康家兴,牛保宁,郝晋瑶.多参数的城市时空热点查询[J].计算机工程与应用,2019,55(10):233-239.
- [41] Alfeo A L, Cimino M G C A, Egidi S, et al. A stigmergy-based analysis of city hotspots to discover trends and anomalies in urban transportation usage [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(7):2258-2267.

(上接第 104 页)