

DOI: 10.20103/j.stxb.202309172005

曹莹, 曾彪, 张富广, 姜榕, 沈艳琦. 黄河上游水源涵养区植被恢复合理目标及恢复策略. 生态学报, 2024, 44(18): 8219-8233.

Cao Y, Zeng B, Zhang F G, Jiang R, Shen Y Q. Reasonable target and restoration strategies of vegetation restoration in a water conservation area of the upper Yellow River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8219-8233.

## 黄河上游水源涵养区植被恢复合理目标及恢复策略

曹 莹, 曾 彪\*, 张富广, 姜 榕, 沈艳琦

兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

**摘要:** 科学设定植被恢复合理目标, 制定适宜可行的恢复策略, 充分发挥植被恢复的固碳效益, 对提高生态修复效率具有重要的现实意义。以黄河上游水源涵养区这一关键生态功能区作为研究区, 以当前实际植被状态为边界条件, 利用 IBIS<sub>i</sub> (Improved Integrated Biosphere Simulator) 模型模拟了近十年平均气候条件下的潜在植被状态, 并以该状态下植被净初级生产力为指标, 设定了研究区短期植被恢复合理目标, 进而估算了区域固碳提升潜力。在此基础上, 通过评估植被受损程度, 识别了重点恢复区域, 并结合生态恢复力及实际植被变化趋势分析, 分区分类对植被恢复策略进行了划分。研究表明: (1) 黄河上游水源涵养区植被净初级生产力恢复目标值平均为  $295.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 可在其植被现状的基础上恢复提升 7.18%; (2) 在当前恢复目标下, 研究区植被恢复固碳提升潜力具有明显的空间差异性, 存在提升潜力的区域面积占比约为 60%, 主要分布在龙羊峡以上以及洮河大夏河流域上游地区; (3) 研究区植被恢复策略应以保育保护和自然恢复为主, 同时应在吉迈水文站以上黄河北岸、共和盆地、龙羊峡库区、贵南沙地、河湟谷地部分区域等重点恢复区, 实施必要的人工辅助修复措施。研究结果可为当地因地制宜开展植被恢复工作提供科学依据和决策支持, 同时也可为其他区域生态修复规划提供思路和方法借鉴。

**关键词:** 植被恢复; 固碳提升潜力; IBIS<sub>i</sub> 模型; 净初级生产力; 黄河上游

## Reasonable target and restoration strategies of vegetation restoration in a water conservation area of the upper Yellow River Basin

CAO Ying, ZENG Biao\*, ZHANG Fuguang, JIANG Rong, SHEN Yanqi

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Setting scientifically reasonable target of vegetation restoration, formulating appropriate and feasible restoration strategies, and maximizing the carbon sequestration benefits of vegetation restoration are of utmost importance in improving the effectiveness of ecological restoration. In this paper, we focused on a key ecological function area of the water conservation area of the upper Yellow River Basin. The Improved Integrated Biosphere Simulator (IBIS<sub>i</sub>) model was used to simulate the potential vegetation state under the average climatic condition of the last ten years by using the current actual vegetation state as the boundary condition. And the short-term reasonable target of vegetation restoration in the study area was set based on the net primary productivity in the potential vegetation state, and the potential improvement of carbon sequestration due to vegetation restoration was then estimated. On the basis of this, priority areas were identified by assessing the degree of damage to the vegetation, and the vegetation restoration strategies for different regions were classified based on the analysis of the ecological resilience and the trend of the actual vegetation change. The results showed that: (1) The average restoration target value for vegetation net primary productivity in the water conservation area of the upper Yellow River Basin was  $295.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , with a potential increase of 7.18% over the current vegetation status. (2) Under the current restoration target, the potential improvement of carbon sequestration in the study area had obviously spatial variability. The areas with significant carbon sequestration potential through vegetation restoration were mainly distributed in

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171274)

收稿日期: 2023-09-17; 网络出版日期: 2024-07-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengb@lzu.edu.cn

the areas above the Longyangxia reservoir and the upper Tao River-Daxia River Basin, accounting for about 60% of the total area. (3) The vegetation restoration strategy in the study area should prioritize conservation and natural restoration. Meanwhile, for key restoration regions such as the northern bank of the Yellow River above the Jimai hydrological station, the Gonghe Basin, the Longyangxia reservoir area, the Guinan sand, and some areas of the Yellow River-Huangshui River valley, the implementation of supplementary artificial restoration measures should effectively support the restoration process. The research findings can provide a scientific basis and decision support for locally tailored vegetation restoration measures, enabling them to be conducted in an appropriate and context-specific manner. In addition, the study can provide valuable insights and methodological references for ecological restoration planning in other regions.

**Key Words:** vegetation restoration; potential improvement of carbon sequestration; IBIS<sub>i</sub> model; net primary productivity; upper Yellow River

为应对各类生态问题以及全球气候变化,世界各国开展了一系列的生态恢复相关研究与实践<sup>[1]</sup>。植被作为陆地生态系统核心组成部分,对调节全球碳循环与碳平衡、减缓气候变暖等具有重要作用<sup>[2]</sup>,恢复和重建退化植被已成为提升陆地生态系统碳汇能力和维持生态系统平衡的关键问题<sup>[3]</sup>。我国大规模的植被恢复建设活动始于改革开放初期,先后启动实施了一大批重大生态工程<sup>[4]</sup>,为提升全国生态环境质量和生态服务功能做出了重要贡献<sup>[4-5]</sup>。但与此同时,过去的实践经验表明,植被恢复如果没有充分匹配其自然本底,不仅会造成资源的浪费,还有可能引发一系列新的生态问题,导致植被建设活动不可持续<sup>[6-7]</sup>。因此,科学设定恢复目标对因地制宜开展植被恢复工作至关重要。

植被恢复目标的设定通常参照区域植被的潜在状态<sup>[8]</sup>,这种潜在植被状态指已经受到干扰的生态系统在某一时段内自然驱动力作用下植被所能达到的最佳状态,代表短期内的植被恢复过程,而非恢复至顶极群落这一理想状态<sup>[9]</sup>。植被恢复目标主要由区域自然环境所决定<sup>[10-11]</sup>,常用的评估指标包括植被覆盖度,净初级生产力等。其中,植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)能够直接反映植被生长状况,代表植被所固定的净有机物量,同时也是生态系统功能和健康状况的重要标识<sup>[12]</sup>。在已有研究中,关于黄河流域 NPP 潜在目标值的估算方法主要包括多元线性回归法<sup>[13]</sup>,以及 Miami 模型、周广胜模型等静态植被模型法<sup>[14-16]</sup>,这些方法简单便捷,但难以量化短期气候变化下植被的演替过程和结果,具有一定的局限性。IBIS (Integrated Biosphere Simulator) 模型是较为综合的动态植被模型<sup>[17]</sup>,其基于交互式框架集成了陆地生物地球化学循环、陆表生物物理过程、植被动态、物候等模块,能够模拟植物的生长、死亡、竞争及其与环境之间的相互作用,很好的弥补了上述方法的不足<sup>[18-19]</sup>,并能输出 NPP 等生态系统重要参数,为评估短期植被恢复目标提供了良好的方法支撑。

在确定植被恢复目标的基础上,划分植被恢复策略是科学落实恢复目标的必要前提。相关学者在不同研究区的结果表明,不同空间单元的植被恢复潜力表现出了明显的差异性,且局部地区植被恢复余地不大,原有的植被恢复策略难以继续适配现状<sup>[11,20-23]</sup>。而如何根据不同区域的现实情况来制定适宜的植被恢复方案,目前在区域尺度上尚未形成完整的体系,迫切需要进一步探究植被恢复策略的分区分类划分,并回答哪些区域是重点恢复区、哪些区域需要人工辅助修复等关键问题,以提高生态修复效率。

黄河上游水源涵养区指黄河流域兰州水文站以上的区域<sup>[24]</sup>,地处青藏高原向黄土高原的过渡地带,总面积约为 22 万 km<sup>2</sup>,占黄河流域总面积的 27.77%,承担着重要的水源涵养和水资源供给功能<sup>[25-26]</sup>。2000 年以来,我国在该区域先后实施了退耕还林、退牧还草、天然林保护等生态工程,有效改善了其生态环境质量,但其草地退化以及水源涵养能力下降等问题尚未得到根本性解决<sup>[7]</sup>。黄河上游水源涵养区是支撑黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的关键区域<sup>[24]</sup>,做好该区域的生态保护和修复工作,对改善和提升黄河流域乃至全国生态系统功能具有重要意义。本研究基于改进的 IBIS 模型模拟了黄河上游水源涵养区的潜在植被状态,并以该状态下的 NPP 为指标,定量评估研究区当前时期的植被恢复合理目标及固碳提升潜力,识别植被

恢复重点恢复区域,并在此基础上,综合考虑植被受损程度、变化趋势和生态恢复力,分区分类划分植被恢复策略,以为当地生态修复规划提供科学依据,推动黄河流域生态保护和高质量发展战略实施。

### 1 研究区概况与数据来源

#### 1.1 研究区概况

黄河上游水源涵养区位于 95.894°E—104.324°E 和 32.160°N—38.292°N 之间,地形复杂多样,地势自西南向东北呈阶梯状下降,其大部分区域属高原高山气候区,年平均气温为 4.25 °C,年降水量为 474.3 mm,降水较少且蒸发强烈。气候时空分布差异显著,年均气温由西向东呈递增趋势,南部降水相对较多,北部降水较少。研究区植被类型主要以草原和草甸为主,其中草甸面积占研究区总面积的 50.62%,草原面积占比为 13.61%;其次为灌丛,面积占比 13.52%。草甸主要分布在唐乃亥水文站以上地区,草原集中分布在唐乃亥以下地区,灌丛、针叶林和阔叶林主要分布在洮河上中游以及大通河中下游地区,栽培植被主要分布在研究区东部的低海拔地区。本文依据全国 1:25 万三级水系流域数据集中的流域分区结果,将黄河上游水源涵养区划分为河源至玛曲、玛曲至龙羊峡、龙羊峡至兰州、洮河大夏河流域、湟水流域 5 个流域分区(图 1)。

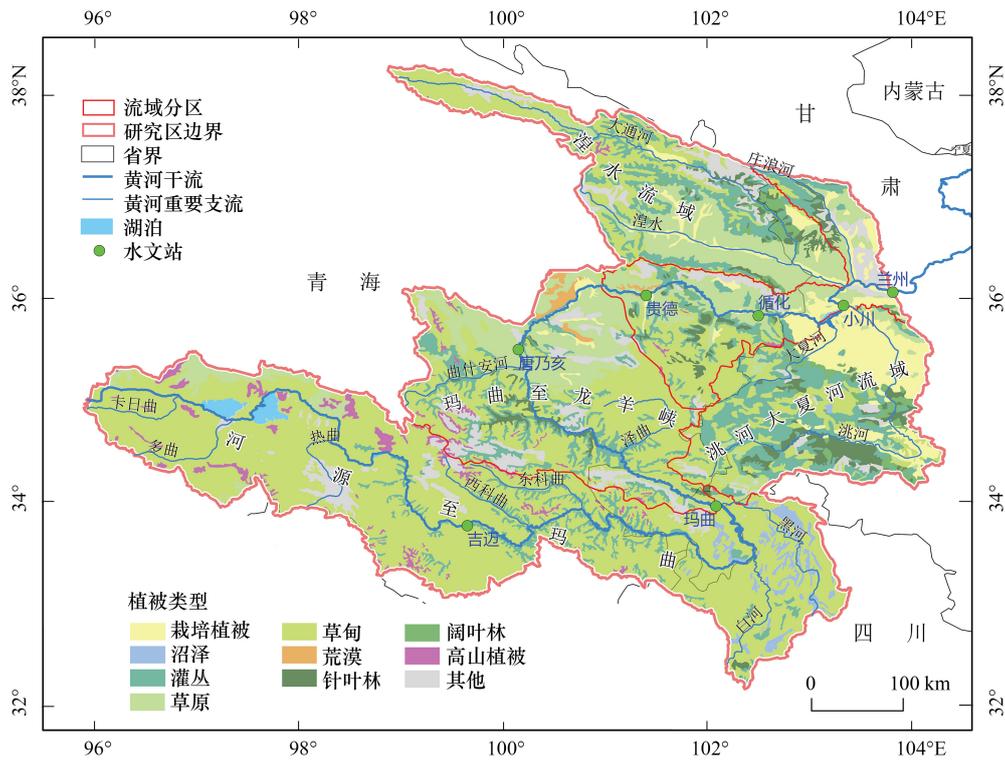


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

#### 1.2 数据来源

本研究所使用的模型驱动数据包括气象日值数据、地形数据、各土层深度的土壤质地数据,以及植被类型、植被功能型分布数据。其中,气象日值数据包括近地面平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速以及云量 7 个要素,利用机器学习法<sup>[27]</sup>对各气象要素数据进行统一空间降尺度,并基于国家气象信息中心提供的气象站观测数据对降尺度后的空间数据进行了校正处理。模型验证数据来源于遥感监测的 NPP 数据产品,同时该数据集也用于实际植被变化特征分析。此外,本研究使用的数据还包括归一化植被指数 (NDVI)、土壤有机碳含量、人口和国内生产总值(GDP)分布数据等,主要用于生态恢复力评价。研究区土地

利用数据来源于中国多时期土地利用遥感监测数据集,同时参考《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017, <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=224BF9DA69F053DA22AC758AAAADDEEAA>),提取草地、林地、湿地以及其他未利用地(沙地、盐碱地、裸土地、裸岩石质地等)的分布范围用于后续统计分析。上述所有数据的空间分辨率均统一至 1 km,具体数据来源详见表 1。

表 1 研究所用数据来源  
Table 1 Data sources used in the study

类别 Category	要素名称 Factor name	数据产品及所用时段 Data product and period used	来源 Source	空间分辨率 Spatial resolution
气象 Meteorology	日气温、降水量、风速、相对湿度	中国区域地面气象要素驱动数据集(1980—2018)	国家青藏高原数据中心( <a href="http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/">http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/</a> )	0.1°
		中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)近实时产品数据集(2018—2020)	国家气象信息中心( <a href="https://data.cma.cn/">https://data.cma.cn/</a> )	0.0625°
	日云量	第五代全球大气再分析气候数据集(ERA5, 1980—2020)	欧洲中期天气预报中心( <a href="https://www.ecmwf.int/">https://www.ecmwf.int/</a> )	0.25°
土壤 Soil	土壤质地、有机碳含量	中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2018)	国家地球系统科学数据中心( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	1 km
植被 Vegetation	植被类型	中国植被数据图	国家冰川冻土沙漠科学数据中心( <a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a> )	1 km
	植被功能型	中国植被功能型图	国家冰川冻土沙漠科学数据中心( <a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a> )	1 km
	16 天 NDVI	MOD13A1 数据产品(2000—2020)	美国国家航空航天局( <a href="https://www.earthdata.nasa.gov/">https://www.earthdata.nasa.gov/</a> )	500 m
	年 NPP	MOD17A3 数据产品(2000—2020)	美国国家航空航天局( <a href="https://www.earthdata.nasa.gov/">https://www.earthdata.nasa.gov/</a> )	500 m
地形 Topography	海拔、坡度、坡向	数字地形高程模型(DEM)数据	地理空间数据云平台( <a href="http://www.gscloud.cn">http://www.gscloud.cn</a> )	90 m
土地利用 Land use	土地利用	中国多时期土地利用遥感监测数据集(2020)	资源环境科学数据注册与出版系统( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	1 km
水系流域 River system and basin	水系流域	全国三级水系流域数据集	国家冰川冻土沙漠科学数据中心( <a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a> )	1 km
社会经济 Socioeconomy	年经济密度	中国 GDP 空间分布公里网格数据集(2019)	资源环境科学数据注册与出版系统( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	1 km
	年人口密度	中国人口空间分布公里网格数据集(2019)	资源环境科学数据注册与出版系统( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	1 km

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; NPP: 植被净初级生产力 Net primary productivity; DEM: 数字高程模型 Digital elevation model; GDP: 国内生产总值 Gross domestic product

## 2 研究方法

### 2.1 植被恢复目标值( $NPP_p$ )估算

本研究选用潜在植被净初级生产力(Potential Net Primary Productivity,  $NPP_p$ )作为植被恢复目标值的表征指标,由 IBIS<sub>i</sub>(Improved Integrated Biosphere Simulator)模型<sup>[17]</sup>模拟得到。IBIS<sub>i</sub>模型以 12 种植被功能型<sup>[19]</sup>(Plant Function Type, PFT)为基本模拟单元,使用逐日气象数据、初始植被类型分布和土壤质地分布等空间数据作为驱动,模拟冠层生理、冠层物理、植被动态、物候变化、土壤地球化学循环等过程,详见 Zeng 等<sup>[17]</sup>。本文根据研究区野外调查和前人研究<sup>[17,28—30]</sup>调整了模型 PFT 设定,并对模型中  $NPP_p$  计算所涉及的关键参数进行了修正,如表 2 所示。

IBIS<sub>i</sub>模型中采用实际植被状态作为边界条件,模拟研究区在自然驱动力作用下的潜在植被状态,其输出的  $NPP_p$  结果在模拟初始状态下包含了气候变化及自然恢复力引起的植被变化<sup>[31]</sup>(式 1)。

表 2 模型关键参数

Table 2 Key parameters of the model

参数 Parameter	默认值 Default value	修正值 Revised value
植被功能型 Plant function types	12 种默认 PFT	温带常绿针叶乔木(TCE)、温带落叶阔叶乔木(TBD)、北方常绿针叶乔木(BCE)、北方落叶针叶乔木(BCD)、落叶灌木(DS)、C3 草、C4 草
比叶面积 Specific leaf area/(m <sup>2</sup> /kg)	TCE: 12.5, TBD: 25.0, BCE: 12.5, BCD: 25.0, DS: 25.0, C3:20.0, C4:20.0	C3:15.0, C4:15.0
叶呼吸系数 Leaf respiration coefficient	TCE: 0.015, TBD: 0.015, BCE: 0.015, BCD: 0.015, DS: 0.015, C3: 0.015, C4: 0.010	DS: 0.010, C3:0.010, C4:0.005

PFT: 植被功能型 Plant function type; TCE: 温带常绿针叶乔木 Temperate conifer evergreen trees; TBD: 温带落叶阔叶乔木 Temperate broadleaf deciduous trees; BCE: 北方常绿针叶乔木 Boreal conifer evergreen trees; BCD: 北方落叶针叶乔木 Boreal conifer deciduous trees; DS: 落叶灌木 Deciduous shrubs

$$NPP_p = NPP_{initial} + C + R \quad (1)$$

式中,  $NPP_{initial}$  (Initial Net Primary Productivity) 代表 IBIS<sub>i</sub> 模型模拟初始状态的 NPP 值,  $C$  (Climate Change)、 $R$  (Resilience) 分别代表由气候变化、自然恢复力引起的植被变化。

模型中关于植被净初级生产力计算的主要控制方程为:

$$NPP_p = (1 - \eta) \int (A_g - R_l - R_s - R_r) dt \quad (2)$$

式中,  $A_g$  代表植被冠层总光合作用效率 ( $\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $\eta$  为植被呼吸所消耗的碳在总碳中的占比,  $R_l$ 、 $R_s$ 、 $R_r$  分别代表植物叶片、茎、根的呼吸效率 ( $\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )。

模拟过程设定 2000 年以前为模型预热期, 2001—2005 年为调参期, 2006—2010 年为验证期, 模拟期为 2011—2020 年(当前时期)。同时, 在空间上, 结合对实际情况的考虑, 本研究剔除了研究区的耕地和建设用地, 仅针对自然植被区进行模拟。然后, 本研究基于多期土地利用类型、居民点位置及道路分布等数据, 根据 Zhang 等<sup>[31]</sup> 研究中提到的验证样本提取方法, 随机选取了研究区内 101 个受人类活动影响较小的样点进行模型验证, 验证样点包含草地、林地等(图 2)。

## 2.2 植被恢复固碳提升潜力估算及重点恢复区识别

### (1) 植被恢复固碳提升潜力估算

在当前植被恢复目标 ( $NPP_p$ ) 下, 本研究按照“现实状态-目标状态-提升潜力”的评估体系, 对研究区植被恢复固碳提升潜力 ( $\Delta NPP_{p-a}$ ) 进行了估算。计算公式如下:

$$\Delta NPP_{p-a} = NPP_p - NPP_a \quad (3)$$

式中,  $NPP_a$  (Actual Net Primary Productivity) 为实际 NPP 值, 来源于遥感监测数据。若  $\Delta NPP_{p-a} \leq 0$ , 表明植被现状已达到其恢复目标; 若  $\Delta NPP_{p-a} > 0$ , 则表明植被现状低于其恢复目标,  $\Delta NPP_{p-a} > 0$  的绝对值越大, 其植被恢复固碳提升潜力越大。

### (2) 植被恢复重点区域识别

植被恢复重点区域指存在恢复潜力 ( $\Delta NPP_{p-a} > 0$ ) 且植被受损程度较大的区域。本研究采用植被恢复潜力指数<sup>[22]</sup> (Vegetation Restoration Potential Index, VRPI) 作为指标, 以消除不同区域 NPP 数值量级的影响, 用以表征植被受损程度, 其计算公式如下:

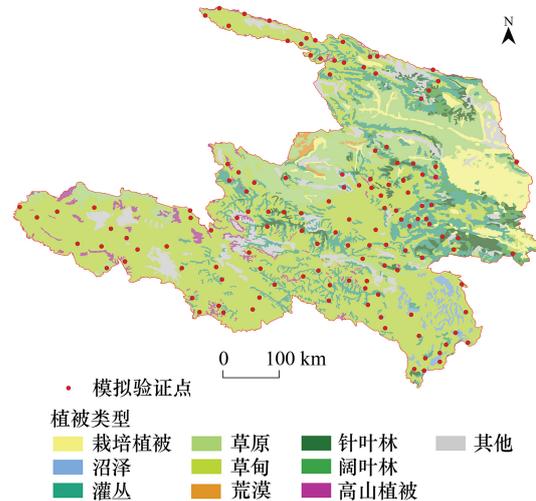


图 2 模拟验证样点空间分布

Fig.2 Spatial distribution of sample points for validating the model

$$VRPI = \frac{\Delta NPP_{p-a}}{NPP_p} \quad VRPI \in (0, 1) \quad (4)$$

在  $\Delta NPP_{p-a} > 0$  的区域中, VRPI 值越接近于 1, 植被受损程度越严重, 作为植被恢复重点区域的优先级越高。

### 2.3 植被恢复策略划分

根据不同区域植被恢复需求的差异, 植被恢复模式包含保护、治理、重建等方式<sup>[32]</sup>。结合我国《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》中的要求, 本文将植被恢复策略划分为保育保护、自然恢复、辅助再生和生态重建四类。其中, 保育保护策略指在已经达到恢复目标的区域以巩固生态建设成果为主, 另外三类策略的对象都是在恢复目标下存在植被受损现象的区域, 不同的是, 自然恢复策略主要是针对植被受损程度较轻且恢复力较强的区域, 强调充分利用自然恢复力, 而辅助再生和生态重建强调需要进行一定程度的人为积极干预, 与辅助再生相比, 生态重建的对象植被受损程度更为严重, 并且其实际植被变化呈退化趋势。

根据图 3 的思路流程, 本研究首先将  $\Delta NPP_{p-a} \leq 0$  的区域划分为保育保护区, 然后对  $\Delta NPP_{p-a} > 0$  的区域按以下三步进行恢复策略划分: (1) 生态恢复力评价, 引入 VRPI 并结合自然本底条件和社会经济因素, 利用综合指数法<sup>[33]</sup>对研究区生态恢复力进行评价(表 4), 评价指标体系见表 3, 各指标权重计算方法为熵值法<sup>[34]</sup>, 数据标准化处理方法为极值归一化法<sup>[34]</sup>; (2) 实际植被变化趋势分析, 基于遥感监测数据, 采用逐像元线性回归法<sup>[35]</sup>计算  $NPP_a$  的年际变化速率, 并分析其变化趋势(表 4); (3) 将上述(1)和(2)得到的结果进行空间叠置分析, 分别划分自然恢复、辅助再生、生态重建策略区, 生态恢复力越高, 选择自然恢复策略的优先级越高

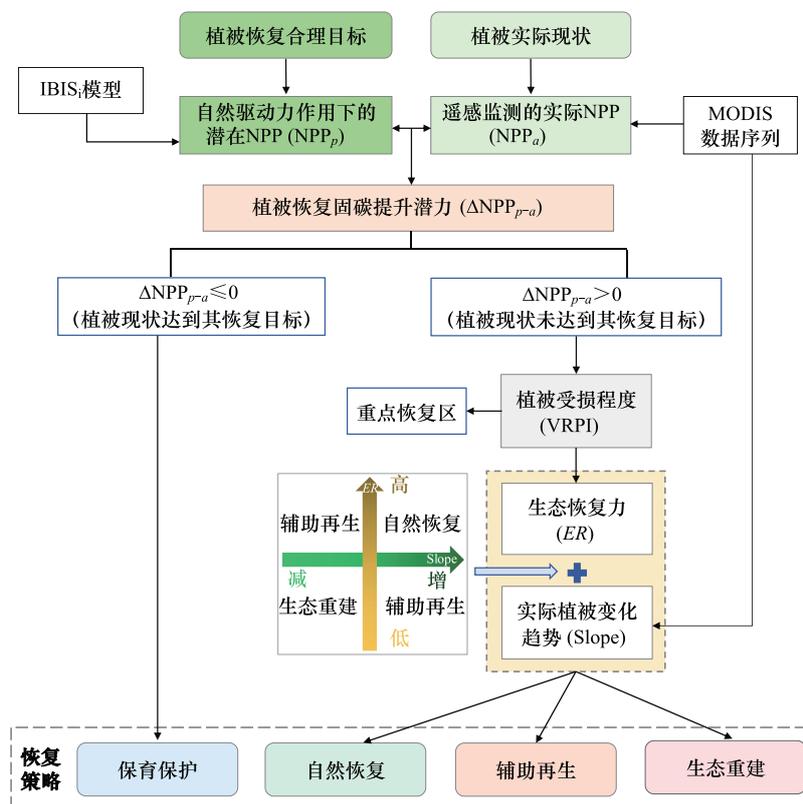


图 3 研究思路图

Fig.3 Flowchart of the research ideas

$NPP_p$ : 潜在植被净初级生产力 Potential net primary productivity;  $NPP_a$ : 实际植被净初级生产力 Actual net primary productivity;  $\Delta NPP_{p-a}$ : 植被恢复固碳提升潜力 Potential improvement of carbon sequestration by vegetation restoration; VRPI: 植被恢复潜力指数 Vegetation restoration potential index; ER: 生态恢复力 Ecological resiliency

(规则详见图 3)。

表 3 生态恢复力评价指标体系及权重赋值

Table 3 Ecological resilience evaluation index system and weight assignment

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	指标权重 Index weight	指标方向 Index direction
生态恢复力 Ecological resiliency	地形	坡度	0.068	负向(-)
		坡向	0.051	正向(+)
		地形起伏度	0.068	负向(-)
	土壤	土壤有机碳	0.088	正向(+)
		土壤砂粒含量	0.072	正向(+)
		土壤粘粒含量	0.068	正向(+)
		植被覆盖度	0.076	正向(+)
	植被	植被恢复潜力指数	0.133	负向(-)
		气候	降水	0.097
	气温		0.078	正向(+)
	风速		0.069	正向(+)
	社会经济	人口密度	0.066	负向(-)
		经济密度	0.066	负向(-)

表 4 生态恢复力及实际植被变化趋势计算公式

Table 4 The formula for calculating the ecological resiliency and actual change trend of vegetation

评价属性 Evaluation attribute	计算公式 Computational formula	变量释义 Interpretation of variables
生态恢复力 Ecological resiliency	$ER_i = \sum_{j=1}^m W_j \times Y_{ij}$	$ER_i$ 代表第 $i$ 个格点的生态恢复力, $W_j$ 为第 $j$ 个指标的权重, $Y_{ij}$ 为第 $i$ 个格点第 $j$ 个指标标准化后的值。
实际植被变化趋势 The actual change trend of vegetation	$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NPP}_{ai} - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NPP}_{ai}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$	Slope 为线性回归方程斜率, 代表评估期内 $\text{NPP}_a$ 的 年际变化速率, 单位为 $\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-2}$ 。 $i$ 为年份, $\text{NPP}_{ai}$ 为第 $i$ 年的 $\text{NPP}_a$ 值。 Slope > 0, 表明 $\text{NPP}_a$ 呈改善趋势, 反之则呈退化趋势。

### 3 结果与分析

#### 3.1 $\text{NPP}_p$ 模拟结果验证

将验证期不同样点 IBIS<sub>i</sub> 模型模拟 NPP 与遥感监测实际 NPP 进行对比, 结果如图 4 所示。在无明显人类活动干扰的样本区, IBIS<sub>i</sub> 模型模拟结果与遥感监测数据具有较好的一致性 ( $R^2 \approx 0.90$ )。同时, 草地和林地地区的模拟 NPP 和监测 NPP 具有较高的拟合度 ( $R^2 = 0.88$  和  $R^2 = 0.89$ )。以上验证结果表明, IBIS<sub>i</sub> 模型对研究区 NPP 的模拟具有良好的可靠性, 为本研究提供了可靠基础。

#### 3.2 黄河上游水源涵养区植被恢复合理目标

本研究基于 2011—2020 年  $\text{NPP}_p$  序列模拟结果, 将其十年的平均状态用以表征研究区当前时期的植被恢复合理目标。总体上, 黄河上游水源涵养区当前植被恢复目标值平均约为  $295.40 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 可在其同期植被现状的基础上恢复提升 7.18%, 其中, 草地恢复目标值

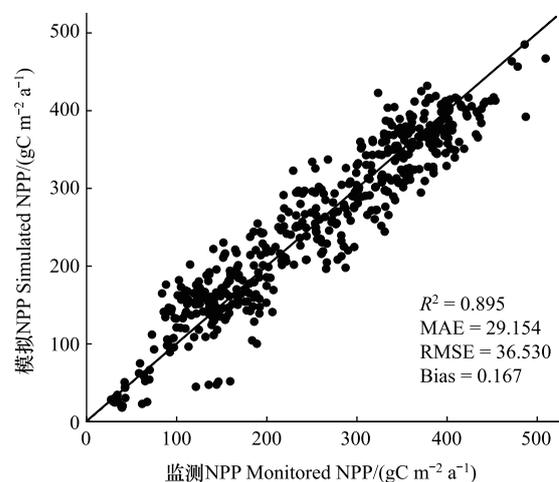


图 4 验证样点处模拟 NPP 与监测 NPP 的对比散点图  
Fig. 4 Scatter plot of simulated NPP and monitored NPP at validation sample sites

$R^2$ : 决定系数 Coefficient of determination; MAE: 平均绝对值误差 Mean absolute error; RMSE: 均方根误差 Root mean square error; Bias: 相对偏差 Relative bias; 图中黑色虚线为 1:1 线

平均为  $289.86 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 林地恢复目标值平均为  $351.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 湿地恢复目标值平均为  $376.24 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 其他未利用地恢复目标值平均为  $189.59 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。从空间分布上看(图 5), 研究区  $\text{NPP}_p$  的高值集中分布在洮河大夏河流域(以林地和草地为主)、玛曲水文站附近(以草地和湿地为主)以及玛曲至龙羊峡黄河两岸(以草地为主)。

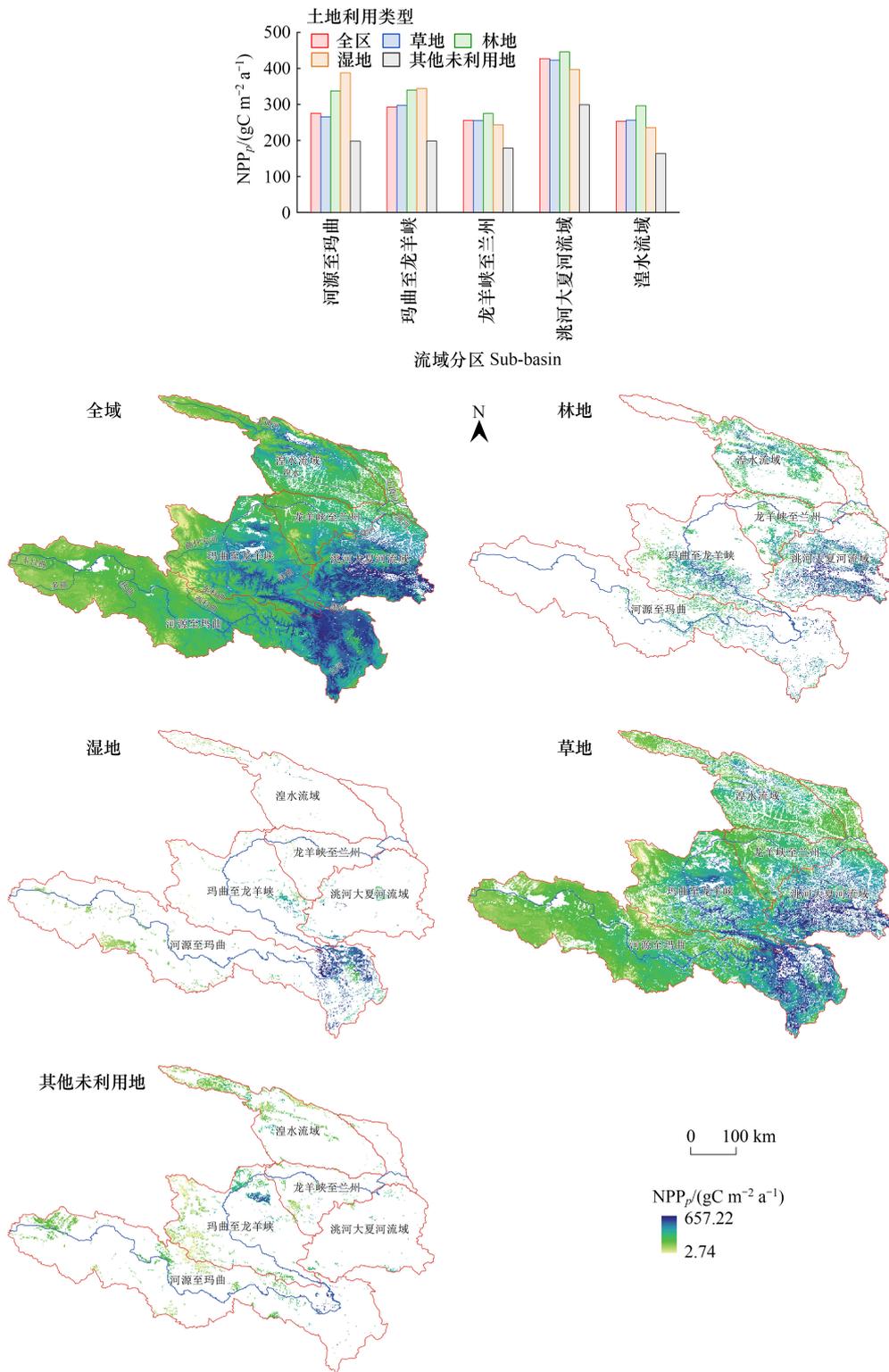


Fig.5 Spatial distribution of  $\text{NPP}_p$  and statistical values for sub-basin from 2011 to 2020

从不同流域分区来看(图 5),洮河大夏河流域的植被恢复目标值最高,平均为  $427.20 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 约比全区平均目标值高 44.57%。其次为玛曲至龙羊峡、河源至玛曲,其植被恢复目标值分别为  $292.58 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $276.84 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。龙羊峡至兰州以及湟水流域植被恢复目标值相对较低,分别为  $255.44 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $253.32 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 约比全区平均目标值低 13.53%、14.25%。

### 3.3 黄河上游水源涵养区植被恢复固碳提升潜力及重点恢复区

研究区全域及不同土地利用类型植被恢复固碳提升潜力( $\Delta\text{NPP}_{p-a}$ )的空间分布如图 6 所示。整体上,黄河上游水源涵养区  $\Delta\text{NPP}_{p-a} > 0$  的区域面积占比约为 60%, 主要分布在龙羊峡以上以及洮河大夏河流域上游地区。其中,河源至玛曲植被恢复固碳提升潜力平均为  $52.16 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 占其实际 NPP 的 23.22%, 是黄河上游水源涵养区固碳提升潜力最大的区域, 其草地、林地、其他未利用地的固碳提升潜力分别为  $47.97 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $43.76 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $68.26 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 湿地固碳提升潜力为  $87.60 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ; 玛曲至龙羊峡植被恢复固碳提升潜力平均为  $37.52 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 其草地、林地、湿地固碳提升潜力分别为  $33.53 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $52.80 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $33.92 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 其他未利用地固碳提升潜力为  $69.33 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ; 洮河大夏河流域植被恢复固碳提升潜力相对较低, 平均为  $20.61 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 仅占其实际 NPP 的 5.07%, 其草地、林地、湿地和其他未利用地固碳提升潜

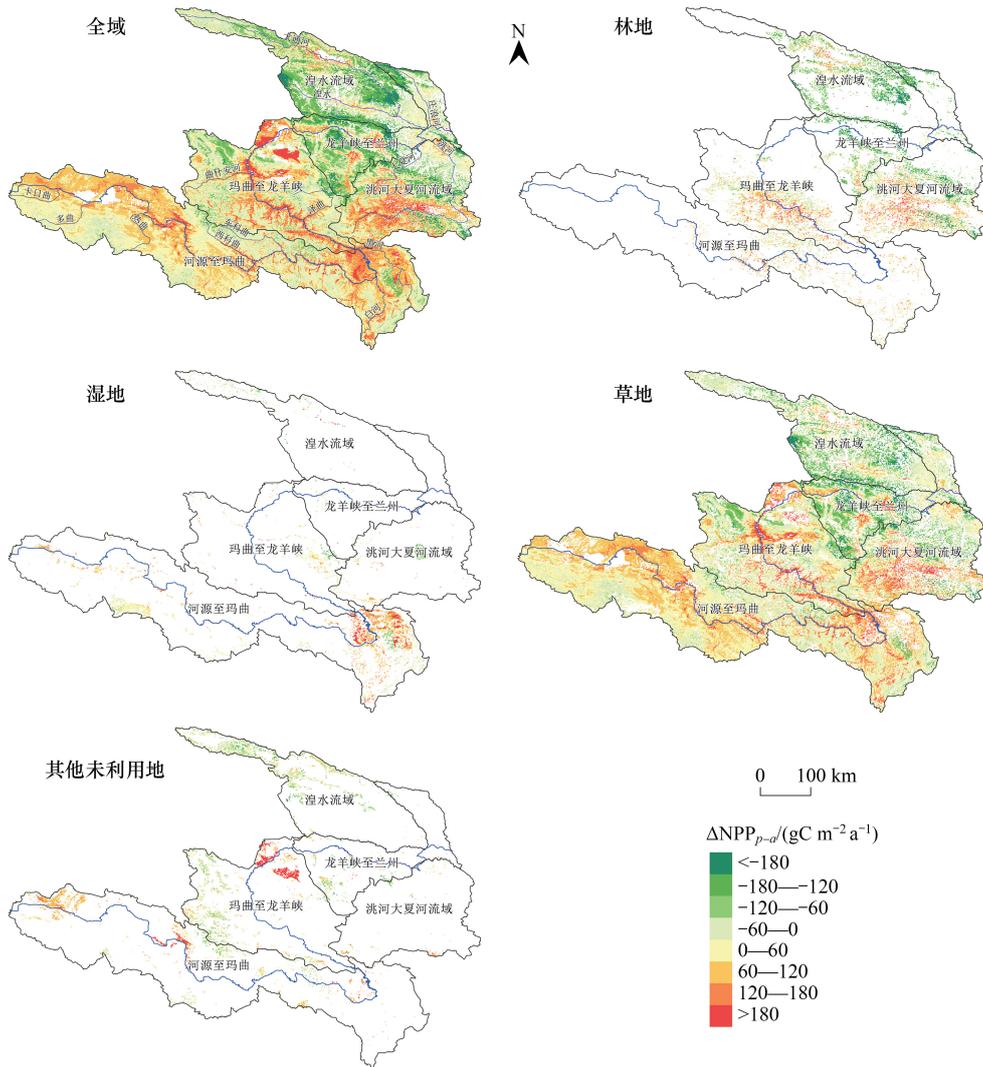


图 6 当前植被恢复目标下  $\Delta\text{NPP}_{p-a}$  空间分布

Fig.6 Spatial distribution of  $\Delta\text{NPP}_{p-a}$  under the current vegetation restoration target

力分别为  $28.15 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $9.36 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $5.54 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $30.47 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。黄河上游水源涵养区  $\Delta\text{NPP}_{p-a} \leq 0$  的区域主要分布在龙羊峡至兰州段以及湟水流域。

在  $\Delta\text{NPP}_{p-a} > 0$  的区域,其植被恢复潜力指数(VRPI)的空间分布如图7所示,VRPI等级越高,其植被受损程度越大。从图7和表5可以看出,黄河上游水源涵养区大部分区域植被受损程度较轻,VRPI低和较低等级的面积占比共为65.07%,VRPI中等等级的面积占比为22.30%。VRPI较高和高等级的面积占比(植被恢复重点区域)约为13.63%,其土地利用类型以沙地、草地、沼泽为主,主要位于吉迈水文站以上的黄河北岸,青海贵南沙地,龙羊峡库区西部和西南部,青海曲什安镇、贵德县、循化县、化隆县、同仁市,甘肃东乡县唐汪镇、玛曲县,以及四川若尔盖县北部等。

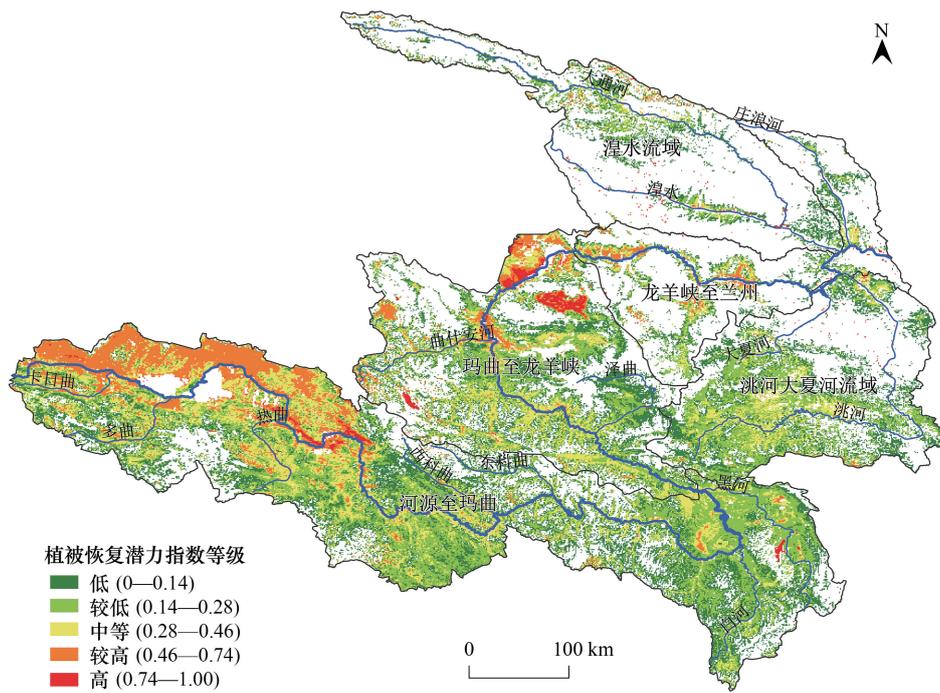


图7 植被恢复潜力指数(VRPI)空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the VRPI

表5 各流域分区植被恢复潜力指数(VRPI)不同等级面积占比/%

Table 5 Area proportion of different VRPI levels in each sub-basin

流域分区 Sub-basin	土地利用类型 Land-use type	低 Low	较低 Medium-low	中等 Medium	较高 Medium-high	高 High
河源至玛曲 Form the source of the Yellow River to Maqu	全区	24.75	35.90	23.71	14.71	0.93
玛曲至龙羊峡 From Maqu to Longyang Gorge	草地	26.00	35.54	24.37	13.61	0.48
	林地	37.84	40.09	20.62	1.37	0.09
	湿地	16.84	51.19	20.68	9.39	1.91
	其他未利用地	9.61	13.70	16.73	51.99	7.97
龙羊峡至兰州 From Longyang Gorge to Lanzhou	全区	30.60	32.73	24.13	9.23	3.33
	草地	32.30	33.53	24.26	9.12	0.78
	林地	29.40	39.31	29.32	1.94	0.03
	湿地	48.42	29.17	15.20	7.21	0.00
龙羊峡至兰州 From Longyang Gorge to Lanzhou	其他未利用地	15.54	17.07	17.13	23.21	27.06
	全区	36.61	29.14	21.25	11.56	1.45
龙羊峡至兰州 From Longyang Gorge to Lanzhou	草地	36.23	28.82	21.89	11.67	1.39

续表

流域分区 Sub-basin	土地利用类型 Land-use type	低 Low	较低 Medium-low	中等 Medium	较高 Medium-high	高 High
洮河大夏河流域 Tao River-Daxia River Basin	林地	50.72	34.05	11.63	0.96	2.64
	湿地	25.32	32.91	21.52	16.46	3.80
	其他未利用地	18.01	24.25	28.18	29.33	0.23
	全区	36.62	44.87	17.53	0.67	0.31
	草地	36.38	45.12	17.56	0.55	0.39
	林地	37.07	45.02	17.65	0.15	0.11
湟水流域 Huangshui River Basin	湿地	43.42	42.03	12.01	1.85	0.69
	其他未利用地	30.70	33.43	20.67	15.20	0.00
	全区	51.24	29.62	12.03	4.11	2.99
	草地	56.26	27.65	10.11	1.85	4.12
	林地	49.26	37.66	11.32	0.99	0.77
	湿地	32.58	32.02	21.35	11.80	2.25

### 3.4 黄河上游水源涵养区植被恢复策略

根据图 3 技术路线,基于植被恢复潜力指数、生态恢复力以及实际植被变化趋势的分析结果,对黄河上游水源涵养区植被恢复策略的划分如图 8 所示。生态恢复力评价结果表明,在研究区存在恢复潜力的区域,其生态恢复力空间分布差异显著,大体呈由南向北递减的空间分布格局(图 8)。研究区 95% 以上的区域  $NPP_a$  呈显著增加趋势( $P < 0.05$ ),平均年际增速约为  $2.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-2}$ ,  $NPP_a$  呈减少趋势的区域呈零星分布,其年际减少速率大部分低于  $1.87 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-2}$ (图 8)。

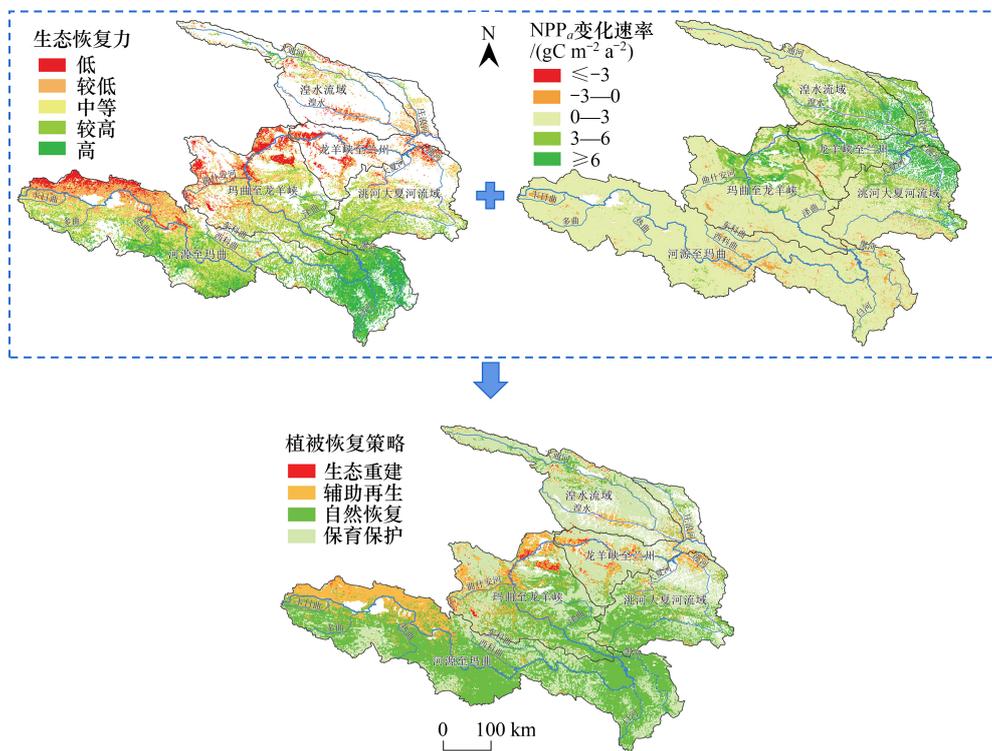


图 8 生态恢复力、 $NPP_a$  年际变化速率及植被恢复策略划分空间分布

Fig.8 Spatial distribution of ecological resilience,  $NPP_a$  interannual change rate and vegetation restoration strategy classification

由图 8 可知,黄河上游水源涵养区植被恢复策略应以保育保护和自然恢复为主,其面积占比共计约 82%。其中,保育保护区主要分布在研究区龙羊峡以下地区,其  $NPP_0$  年际增速较快,植被状况明显改善,已达到当前恢复目标值;自然恢复区主要分布在龙羊峡以上以及洮河上游地区,其植被受损程度低且生态恢复力强。研究区辅助再生策略区面积占比约为 17%,主要分布在吉迈水文站以上黄河北岸、共和盆地、河湟谷地以及洮河下游地区等。生态重建策略区主要分布在龙羊峡库区、青海贵南沙地等,其面积占比仅为 1%,土地利用类型主要为其他未利用地。

从不同流域分区来看(表 6,图 8),河源至玛曲段植被恢复策略应以自然恢复为主,并在黄河源区北部草地、沙地辅以人工修复措施;玛曲至龙羊峡段应以自然恢复为主,辅助再生为辅,在沙地分布区考虑实施生态重建;龙羊峡至兰州段黄河干流沿岸的部分区域应采取辅助再生策略,其他区域以保育保护为主;湟水流域应以保育保护和自然恢复为主,并在未利用地辅以人工修复措施;洮河大夏河流域的上游地区应以自然恢复为主,下游地区应以保育保护和辅助再生为主。各流域分区在不同植被恢复策略下的恢复目标与固碳提升潜力具有较大差异性,通过实施改善生境、引入本地适宜物种等辅助再生或生态重建类的人工生态修复措施,部分区域仍有较大的固碳提升潜力(图 6,图 8)。

表 6 各流域分区不同植被恢复策略面积占比/%

Table 6 Area proportion of different revegetation strategies in each sub-basin

流域分区 Sub-basin	土地利用类型 Land-use type	保育保护 Conservation and protection	自然恢复 Natural restoration	辅助再生 Assisted regeneration	生态重建 Ecological reconstruction
河源至玛曲 Form the source of the Yellow River to Maqu	全区	17.29	65.19	17.32	0.19
	草地	17.63	65.45	16.76	0.15
	林地	22.43	75.14	2.41	0.02
	湿地	9.91	83.18	6.91	0.00
	其他未利用地	18.87	26.60	53.15	1.38
玛曲至龙羊峡 From Maqu to Longyang Gorge	全区	34.05	40.75	22.54	2.66
	草地	36.10	40.53	22.02	1.36
	林地	22.50	59.61	17.53	0.36
	湿地	27.11	60.93	11.36	0.60
	其他未利用地	35.94	12.35	36.67	15.04
龙羊峡至兰州 From Longyang Gorge to Lanzhou	全区	68.54	8.21	20.64	2.62
	草地	65.91	8.32	23.05	2.72
	林地	82.57	8.42	8.54	0.47
	湿地	51.32	11.64	33.33	3.70
	其他未利用地	56.46	4.06	28.23	11.25
洮河大夏河流域 Tao River-Daxia River Basin	全区	36.73	52.96	10.03	0.29
	草地	35.73	52.96	10.96	0.35
	林地	38.40	54.10	7.37	0.13
	湿地	48.48	50.91	0.61	0.00
	其他未利用地	29.33	28.13	41.35	1.20
湟水流域 Huangshui River Basin	全区	76.37	12.46	10.47	0.70
	草地	76.93	10.85	11.61	0.60
	林地	78.98	16.25	4.69	0.08
	湿地	63.58	24.84	11.37	0.21
	其他未利用地	69.68	12.09	15.76	2.46

#### 4 讨论

在已有的相关研究中,植被恢复目标参照系的选择大多是根据相似生境原则,将过去一段时期评估单元内不同生态系统的最佳植被状态作为参考<sup>[11,21-22,36-38]</sup>,为评估植被恢复目标提供了较好的方法指引,但其得

到的结果掺杂了过去人类活动的影响,难以有效获取满足评估要求的自然植被状态。近年来,相关研究利用自然保护区内气候变化下的顶级生态系统状态作为恢复参照<sup>[13,20,39]</sup>,但其并未考虑评估初期受干扰生态系统的自然恢复过程。本文采用的恢复参照是使用 IBIS<sub>v</sub>模型模拟得到的潜在植被状态,该模拟结果是气候变化和自然恢复力共同作用下的自然耦合结果,能够有效剥离人类活动对生态系统的直接影响。本研究暂未考虑人类活动作用于气候变化并反馈于生态系统的间接影响。目前,完全避免人类活动影响仍然是未来研究的重点和难点问题。此外,由于当前植被恢复措施主要以提高地表植被覆盖为直接目的,所以本文选择 NPP 作为恢复目标的表征指标,该指标在 IBIS<sub>v</sub>模型中受周围环境的交互作用,土壤水分、养分等状况均能够反馈到植被生产力状况中<sup>[17]</sup>。未来仍需构建多目标指标体系,统筹考虑生态系统功能的整体提升。同时,在估算其他区域植被恢复目标参照时,还需结合区域实际情况对 IBIS<sub>v</sub>模型参数进一步调整和优化。

本研究将黄河上游水源涵养区潜在植被状态作为其植被恢复合理目标,并以此为参考判断区域现状是否达到该目标,明确了未达到目标区域的固碳提升潜力及植被受损程度,同时结合生态恢复力和实际植被变化趋势分析,分区分类对研究区植被恢复策略进行了划分。相较于先前相关研究<sup>[40-46]</sup>,这种基于自然本底的植被恢复策略划分避免了对已达到目标区域的过多干预,并识别了自然或人工恢复区域,可以有效提升恢复效率和效益,可为当前国土空间生态修复规划研究提供思路和方法借鉴。

本文基于研究区本底条件因地制宜划分的植被恢复策略包括保育保护、自然恢复、辅助再生和生态重建。在龙羊峡至兰州段以及湟水流域的草地和林地区域,大部分植被现状已达到恢复目标,宜主要采取保育保护策略,巩固生态建设成效<sup>[4]</sup>。在黄河源南部的草地、吉迈至玛曲段的草地和湿地、玛曲至龙羊峡段以及洮河上游地区的林地和草地区域,大部分植被受损程度较低且生态恢复力较强,宜主要采取自然恢复策略,充分利用自然演替过程实现固碳提升潜力<sup>[32]</sup>。而在黄河源北部的草地和沙地区域等,植被受损程度较高但恢复力一般,宜采取辅助再生策略,加强草地优先保护和合理利用,加大退化草地治理力度,进而提升区域草地植被固碳功能,改善黄河上游关键生态区碳汇能力<sup>[47-48]</sup>。特别是在龙羊峡水库周边以及青海贵南县沙地区域,植被受损程度严重,且实际植被变化仍呈退化趋势,宜采取生态重建策略,消除环境胁迫因子,重构生境,促进植物群落正向演替过程<sup>[32,39]</sup>。黄河上游水源涵养区植被恢复规划布局应优先重点考虑辅助再生和生态重建策略区,分区分类制定具体恢复措施,以高效实现区域植被恢复合理目标。上述基于植被恢复策略的土地利用优化将有效提升青藏高原地区的植被恢复固碳效益和生态修复效率<sup>[39]</sup>。

## 5 结论

本研究选用植被净初级生产力为指标,利用 IBIS<sub>v</sub>模型模拟评估了黄河上游水源涵养区当前时期的植被恢复合理目标,并在该恢复目标下,估算了研究区植被恢复固碳提升潜力,识别了重点恢复区域,并分区分类划分了恢复策略。主要研究结论如下:

(1) 黄河上游水源涵养区植被净初级生产力恢复目标值平均为  $295.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,可在当前现状的基础上恢复提升 7.18%。

(2) 在恢复目标下,黄河上游水源涵养区存在植被恢复固碳提升潜力的区域主要分布在龙羊峡以上以及洮河大夏河流域上游地区,其面积占比共计约为 60%,土地利用类型主要为草地、湿地和其他未利用地;而龙羊峡至兰州段以及湟水流域的大部分地区植被现状目前已达到其短期恢复目标。

(3) 黄河上游水源涵养区植被恢复策略应以保育保护和自然恢复为主,同时应在吉迈水文站以上的黄河北岸、共和盆地、龙羊峡库区、贵南沙地、河湟谷地部分区域等重点恢复区,实施必要的人工辅助修复措施。

## 参考文献(References):

- [1] Jiang X, Sun Y T, Qu Y P, Zeng H Y, Yang J T, Zhang K Y, Liu L. The development and future frontiers of global ecological restoration projects in the twenty-first century: a systematic review based on scientometrics. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(12): 32230-32245.

- [ 2 ] Arora V. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(2): 1006.
- [ 3 ] 陶波, 葛全胜, 李克让, 邵雪梅. 陆地生态系统碳循环研究进展. *地理研究*, 2001, 20(5): 564-575.
- [ 4 ] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 刘国波, 杨帆, 张雄一, 牛丽楠, 黄海波, 樊江文, 刘纪远. 2000—2019 年中国重大生态工程生态效益遥感评估. *地理学报*, 2022, 77(9): 2133-2153.
- [ 5 ] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 122-129.
- [ 6 ] Shao M A, Wang Y Q, Xia Y Q, Jia X X. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: a review. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-8.
- [ 7 ] 王艳芬, 陈怡平, 王厚杰, 吕一河, 郝彦宾, 崔骁勇, 王玉哲, 胡容海, 薛凯, 傅伯杰. 黄河流域生态系统变化及其生态水文效应. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 520-528.
- [ 8 ] 刘华民, 吴绍洪, 郑度, 杨勤业. 潜在自然植被研究与展望. *地理科学进展*, 2004, 23(1): 62-70.
- [ 9 ] 任海, 陆宏芳, 李意德, 温远光. 植被生态系统恢复及其在华南的研究进展. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27(5): 469-480.
- [ 10 ] Xu X, Zhang D J. Comparing the long-term effects of artificial and natural vegetation restoration strategies: a case-study of Wuqi and its adjacent counties in Northern China. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(14): 3930-3945.
- [ 11 ] Xu X, Zhang D J, Zhang Y, Yao S B, Zhang J T. Evaluating the vegetation restoration potential achievement of ecological projects: a case study of Yan'an, China. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104293.
- [ 12 ] McNaughton S J, Oesterheld M, Frank D A, Williams K J. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*, 1989, 341: 142-144.
- [ 13 ] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 杨雪清, 刘树超, 刘国波, 张雄一, 黄海波. 黄土高原生态恢复程度及恢复潜力评估. *自然资源学报*, 2023, 38(3): 779-794.
- [ 14 ] Wang H, Liu G H, Li Z S, Wang P T, Wang Z Z. Assessing the driving forces in vegetation dynamics using net primary productivity as the indicator: a case study in Jinghe River Basin in the Loess Plateau. *Forests*, 2018, 9(7): 374.
- [ 15 ] Zheng K, Wei J Z, Pei J Y, Cheng H, Zhang X L, Huang F Q, Li F M, Ye J S. Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 236-244.
- [ 16 ] 施亚林, 曹艳萍, 苗书玲. 黄河流域草地净初级生产力时空动态及其驱动机制. *生态学报*, 2023, 43(2): 731-743.
- [ 17 ] Zeng B, Zhang F G, Wei L L, Zhang X M, Yang T B. An improved *IBIS* model for simulating NPP dynamics in alpine mountain ecosystems: a case study in the eastern Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *CATENA*, 2021, 206: 105479.
- [ 18 ] Liu J X, Lu X H, Zhu Q A, Yuan W P, Yuan Q Z, Zhang Z, Guo Q X, Carol D. Terrestrial ecosystem modeling with *IBIS*: progress and future vision. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(1): 2-16.
- [ 19 ] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [ 20 ] 张雄一, 邵全琴, 宁佳, 刘树超, 牛丽楠, 杨雪清, 黄海波. 长江上游地区生态恢复程度及植被恢复潜力空间差异分析. *地理研究*, 2023, 42(7): 1904-1920.
- [ 21 ] 易海杰, 张晓萍, 何亮, 邹亚东, 吕渡, 许小明, 贺洁, 王祎宸, 田起隆. 黄土高原不同地貌类型区植被恢复潜力及其土地利用变化. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 255-263.
- [ 22 ] 吕振涛, 李生宇, 范敬龙, 刘国军, 王海峰, 孟晓于. 蒙古国植被自然恢复潜力. *中国沙漠*, 2021, 41(5): 192-201.
- [ 23 ] Peng S Z, Yu K L, Li Z, Wen Z M, Zhang C. Integrating potential natural vegetation and habitat suitability into revegetation programs for sustainable ecosystems under future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269/270: 270-284.
- [ 24 ] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定. *水文*, 2022, 42(2): 65.
- [ 25 ] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 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. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [ 26 ] Zhang Y, Du J Q, Guo L, Sheng Z L, Wu J H, Zhang J. Water conservation estimation based on time series NDVI in the Yellow River Basin. *Remote Sensing*, 2021, 13(6): 1105.
- [ 27 ] Cao Y, Zeng B, Zhang F G, Shen Y Q, Meng Z H, Jiang R. A spatial downscaling method for multielement meteorological data: case study from a water conservation area of the upper Yellow River Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 2023, 153(1): 853-871.
- [ 28 ] Chen M, Willgoose G R, Saco P M. Evaluation of the hydrology of the *IBIS* land surface model in a semi-arid catchment. *Hydrological Processes*, 2015, 29(5): 653-670.
- [ 29 ] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, Fisher V A, Coe M T, Lenters J D, Young-Molling C, Ramankutty N, Norman J M, Gower S T. Testing the

- performance of a dynamic global ecosystem model; water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.
- [30] 杨延征, 马元丹, 江洪, 朱求安, 刘金勋, 彭长辉. 基于 IBIS 模型的 1960—2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究. *生态学报*, 2016, 36(13): 3911-3922.
- [31] Zhang F G, Zeng B, Yang T B, Zheng Y X, Cao Y. A multi-perspective assessment method with a dynamic benchmark for human activity impacts on alpine ecosystem under climate change. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 208.
- [32] 任海, 彭少麟, 陆宏芳. 退化生态系统恢复与恢复生态学. *生态学报*, 2004, 24(8): 1760-1768.
- [33] 朱国宇, 熊伟. 模糊评价法与综合指数法在生态影响后评价中的应用比较研究. *东北农业大学学报*, 2011, 42(2): 54-59.
- [34] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨. *统计与决策*, 2015(2): 12-15.
- [35] 燕丹妮, 武心悦, 王博恒, 郝红科. 1982—2015 年黄土高原植被变化特征及归因. *生态学报*, 2023, 43(23): 9794-9804.
- [36] 靳峰, 戈文艳, 秦伟, 韩剑桥, 马涛, 郑安. 甘肃省植被时空变化及其未来发展潜力. *中国水土保持科学: 中英文*, 2023, 21(1): 110-118.
- [37] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 高鹏, 孙文义, 许文龙. 黄土高原植被变化与恢复潜力预测. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 205-212.
- [38] Zhang D J, Xu X, Yao S B, Zhang J T, Hou X H, Yin R S. A novel similar habitat potential model based on sliding-window technique for vegetation restoration potential mapping. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 760-772.
- [39] 陈美祺, 邵全琴, 宁佳, 刘国波, 刘树超, 牛丽楠, 张雄一, 黄海波. 青藏高原不同生态地理区生态恢复状况分析. *草地学报*, 2023, 31(4): 1211-1225.
- [40] Han B, Jin X B, Xiang X M, Rui S, Zhang X L, Jin Z F, Zhou Y K. An integrated evaluation framework for Land-Space ecological restoration planning strategy making in rapidly developing area. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107374.
- [41] Chen X Q, Kang B Y, Li M Y, Du Z B, Zhang L, Li H Y. Identification of priority areas for territorial ecological conservation and restoration based on ecological networks; a case study of Tianjin City, China. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109809.
- [42] Xu W J, Yao W L, Bai Z K, Yang J Z, Li L. Ecological risk evaluation and ecological restoration model of mining in the source area of the Yellow River Basin. *Land*, 2023, 12(4): 933.
- [43] 李杨帆, 向枝远, 杨奕, 王泉力, 李艺. 基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 130-140.
- [44] 辛顺杰, 连华, 梁浩东, 肖凯文, 李若颀. 基于“山水林田湖草沙”生命共同体理念的生态问题识别与修复策略——以甘南洮河流域为例. *草业科学*, 2022, 39(6): 1256-1268.
- [45] 闫玉玉, 孙彦伟, 刘敏. 基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3369-3378.
- [46] 张海铃, 叶长盛, 胡梦娜. 基于生态安全格局的环鄱阳湖城市群生态修复关键区域识别及修复策略. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 393-402.
- [47] 王菲, 曹永强, 周姝含, 范帅邦, 姜雪梅. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素. *生态学报*, 2023, 43(6): 2501-2514.
- [48] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1): 61-72.