

DOI: 10.20103/j.stxb.202212303709

刘晓曼, 侯鹏, 高吉喜, 陈艳梅, 吕娜. 基于区域生态学我国流域可持续发展面临的问题及应对策略. 生态学报, 2024, 44(12): 4956-4963.

Liu X M, Hou P, Gao J X, Chen Y M, Lü N. Problems and countermeasures of watershed sustainable development based on regional ecology. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 4956-4963.

# 基于区域生态学我国流域可持续发展面临的问题及应对策略

刘晓曼<sup>1</sup>, 侯 鹏<sup>1</sup>, 高吉喜<sup>1,\*</sup>, 陈艳梅<sup>2</sup>, 吕 娜<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

<sup>2</sup> 河北师范大学, 石家庄 050024

**摘要:** 流域是最为典型的生态区域, 也是我国生态文明建设和山水林田湖草生命共同体的重要载体, 流域可持续发展对国家经济社会发展和生态安全都具有十分重要的作用。日趋紧张的人地关系, 对流域的生态文明建设和可持续发展提出新的挑战。引入区域生态学的理论及方法, 在总结区域生态学的研究对象、研究内容、研究目标和研究尺度基础上, 剖析了妨碍我国流域可持续发展的主要区域生态问题, 并从流域生态格局-过程-功能协调发展、实现流域间地-地耦合、构建与生态承载力相适宜的人居环境和产业结构、建立生态补偿机制等四个方面提出了基于区域生态学理论和方法的应对策略, 以引导我国新时期流域的可持续发展。

**关键词:** 区域生态学; 流域; 耦合; 可持续发展; 策略

## Problems and countermeasures of watershed sustainable development based on regional ecology

LIU Xiaoman<sup>1</sup>, HOU Peng<sup>1</sup>, GAO Jixi<sup>1,\*</sup>, CHEN Yanmei<sup>2</sup>, LÜ Na<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

<sup>2</sup> Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

**Abstract:** Watershed is the most typical ecological area. It is also an important carrier for the construction of ecological civilization and the life community of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses in China. The sustainable development of watershed plays a very important role in national economic and social development and ecological security. The increasingly tense relationship between man and land poses new challenges to the construction of ecological civilization and sustainable development of the river basin. This paper introduces the theories and methods of regional ecology and analyzes the key problems of regional ecology related to the sustainable development of river basins. The main ecological problems are summarized in the sustainable development of river basins in China. The countermeasures for sustainable development of river basins are put forward from four aspects, including the coordinated development of river basin ecological pattern-process-function, the realization of land-land coupling between river basins, the construction of human settlements and industrial structure suitable for ecological carrying capacity, and the establishment of ecological compensation mechanism. It is helpful to guide the rational development of river basins in China.

**Key Words:** regional ecology; watershed; coupling; sustainable development; countermeasure

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF1303403)

收稿日期: 2022-12-30; 网络出版日期: 2024-04-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjx@nies.org

随着经济的高速发展,城市化进程加快,在人类活动的强烈影响下,长期以来形成的合理的区域生态结构-过程-功能遭到严重破坏,工业污染和生态破坏呈加剧趋势,环境问题日益凸显<sup>[1]</sup>,全球资源环境面临前所未有的压力,地球进入“人类世”的新纪元<sup>[2-3]</sup>。为缓解经济发展对生态的影响,2015年,联合国提出17个可持续发展目标(SDGs),旨在通过自然和社会系统的力量,从单纯的环境保护转向结合生态、经济和社会知识进行区域生态恢复和管理<sup>[4]</sup>。随着全球经济一体化、区域发展一体化,人类对环境的影响从局地扩展到区域甚至全球,环境污染和生态破坏呈现区域性和综合性特征<sup>[5-8]</sup>。传统生态学的理论和方法侧重种群生态和景观生态,难以阐释宏观尺度区域生态问题,必须从区域综合性视角寻求解决这些问题的途径和方法,因此如何将生态学原理和方法应用到解决区域生态问题成为社会关注的热点<sup>[6]</sup>。在此背景下,生态学发展迫切需要创建一门探讨基于区域尺度的生态系统管理理论与实践的系统学科——区域生态学,将研究尺度从局部扩展到宏观,以研究区域生态系统的结构、过程与功能之间的相互作用及其演变机制,为区域可持续发展提供指导<sup>[9]</sup>。

区域生态学是研究区域内部生态结构、过程和功能,以及区域间生态要素耦合和相互作用机理的生态学子学科,援引了地理学中的“区域”和生态学中的“生态学”的概念<sup>[9]</sup>。区域生态学的起源可追溯到20世纪70年代空间规模概念在生态研究领域的出现<sup>[10]</sup>,科学家意识到部分生态问题具有区域性<sup>[11-13]</sup>。国际上,区域生态学的真正诞生时间应该是2003年,Blackburn和Gaston撰写的英国生态学会第43次年会会议记录,以及Kevin Gaston出版的《The Structure and Dynamics of Geographic Ranges》专著,标志着区域生态学作为一门学科在解决具有区域地理特征问题中的重要性已经得到了认可<sup>[14-19]</sup>。2015年,高吉喜出版了国内第一本区域生态学专著,探讨了区域尺度生态系统管理的理论与实践<sup>[9]</sup>。在中国,区域生态学的研究更注重解决经济发展过程中的生态环境问题,为区域可持续发展提供解决方案<sup>[20-22]</sup>。

流域以水为介质,是最为典型的生态区域,也是我国生态文明建设和山水林田湖草生命共同体的重要载体<sup>[23]</sup>。人类文明大多发源于流域,一些大型的流域如黄河流域、长江流域都是我国重要的生态屏障和重要的经济地带<sup>[24]</sup>,流域可持续发展对国家经济社会发展和生态安全都具有十分重要的作用<sup>[25]</sup>,从长江流域的“共抓大保护,不搞大开发”到黄河流域的“共同抓好大保护,协同推进大治理”,均体现了生态文明建设下的新型区域发展理念。然而,随着人类不合理的开发和利用,我国流域人地关系日趋紧张<sup>[26]</sup>,对流域的可持续发展提出了新的挑战。流域作为一个完整的生态功能体通过水循环以及伴生的土壤营养物质将子流域内部连接成为一个有机整体,有完整的区域表现,更关注以水为介质的上、中、下游在结构、过程和功能方面的生态完整性和相互作用机制。区域生态学侧重于立足区域整体、从全局角度分析问题,能为流域的可持续发展提供重要指导。因此在治理我国流域生态环境问题时,迫切需要将流域作为一个整体区域,运用区域生态学理论及方法对其进行指导,避免“头痛医头,脚痛医脚”。本文基于该考虑,通过引入区域生态学的理论和方法,剖析了妨碍我国流域可持续发展的主要区域生态问题,在此基础上,提出了基于区域生态学的流域可持续发展应对策略,以引导我国流域的合理发展。

## 1 区域生态学的关键问题

### 1.1 区域生态学的研究对象

区域生态学以区域性为特点,研究对象包括供体和受体两种生态功能体,二者通过水、空气、资源等不同的介质发生联系,相互影响、相互作用,进而形成流域、风域和资源域三类生态域<sup>[22]</sup>。主要包括以下三个研究对象:

#### (1) 生态域

区域的概念最早起源于地理学,地理区域主要指自然地理学体系中的区域实体<sup>[22]</sup>。随着人类社会的发展和学科领域的拓展,区域的概念和内涵也在不断变化,已不仅仅是空间的概念了,更强调不同地域之间因某种联系而形成的共同体。因此,生态学中也有了“生态域”的概念,即具有相对完整生态结构、生态过程和

生态功能的地域综合体<sup>[9]</sup>。

(2) 生态介质

生态介质是生态区域的联系纽带和核心要素,因为生态介质的作用,才使一个区域不同单元之间联系起来,形成完整的更大单元。在流域中,生态介质是水,它将上游水源涵养区与下游居住区联系起来,形成一个完整的生态域<sup>[9]</sup>。

(3) 生态功能体

生态功能体指具有完整结构和功能的生态区域,是区域生态学研究的基本单元。具有不同生态功能的地域单元就形成了不同的生态功能体,可分为生态供体和生态受体。其中生态供体指生态区域中提供水源涵养、土壤保持、气候调节、防风固沙、提供产品等生态系统服务的生态功能体,其在保障区域生态安全以及促进区域可持续发展过程中具有重要作用。生态受体指生态区域中接受生态系统服务的生态功能体<sup>[9]</sup>。

1.2 区域生态学的研究内容

区域生态学的核心研究内容包括了如下四个方面

(图 1):

(1) 区域生态系统结构、过程与功能

区域生态系统结构包括区域生态系统的组分和空间格局;生态系统过程是指生态区域内部各类生态要素、生态系统和功能体之间的物质、能量循环转移的路径;生态系统功能是指生态域基于其生态结构在生态过程中提供产品和服务的能力<sup>[9]</sup>。

生态结构-过程-功能三个方面相互影响、相互联系,构成“三位一体”的统一整体。区域生态系统结构变化决定和制约着过程和功能的变化,但过程和功能也可以反作用于结构,过程是塑造结构的动因和驱动力,生态结构和过程的相互作用会表现出不同的生态功能。生态域内,探讨生态结构是否完整、生态过程是否连续、生态功能是否匹配,从而揭示生态域内生态结构、过程与功能的特点与规律,能更好地服务于区域间协调发展<sup>[22]</sup>。

(2) 生态供体-受体耦合

生态供体-受体耦合是指基于生态供体与生态受体的地-地耦合和人-地耦合的双耦合关系,是区域生态学研究的核心部分<sup>[6]</sup>。生态功能体的研究:一是侧重从区域整体视角研究内部生态系统的结构完整性、过程连续性与功能匹配性,以评估生态供体与生态受体之间的协调性;二是研究不同生态功能体之间的相互作用机理和耦合机制,如生态服务、生态经济产品和能源资源在生态域之间的分配,以及生态供体和生态受体之间的生态服务辐射、生态经济产品流转和能源资源流转<sup>[27]</sup>。

地-地耦合是指生态区域中生态供体与生态受体在空间上的耦合。在生态域内,生态功能体相互制约、相互影响,不停地发生各种能量与物质的交换<sup>[6]</sup>。解决区域协调问题的核心是统筹兼顾生态域内不同功能体的自然条件与经济利益,实现生态供体与生态受体之间在格局上配置完整、过程中连续通畅、功能间互利互惠。

人-地耦合是指生态域内自然地理环境与人类社会经济所构成相互作用、相互影响的复杂系统之间的耦合<sup>[9]</sup>。生态供体提供的生态资源,以及各种生态系统的自我维持与自我调节能力,决定着受体区人居环境的整体功能和质量,对整个生态域内人居环境、产业结构与布局模式有特定的约束性,是支撑人居与经济发展的基础。健康的人-地耦合关系,决定了人居生态适宜性与产业生态适宜性<sup>[9]</sup>。

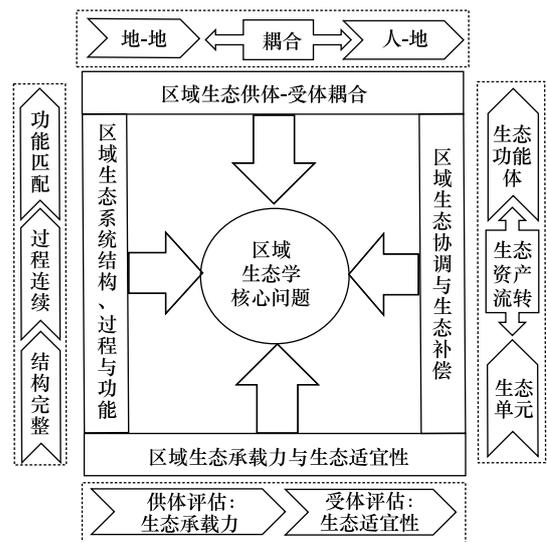


图 1 区域生态学主要研究内容

Fig.1 Key issues of regional ecology

(3) 区域生态承载力与生态适宜性

区域生态承载力与生态适宜性评价是研究区域生态学的核心内容。生态供体的生态承载能力的维系与提升直接关系到整个生态域的可持续发展。因此对生态供体而言,主要评估生态承载力和生态服务供给力。受体在接受供体提供生态服务和产品后,为确保经济开发和资源利用在区域生态适宜范围内,需开展人居适宜性和生产适宜性研究,建立与生态域承载能力相适宜的产业结构和人居环境,因此生态适宜性是受体评估的重要内容。区域生态承载力与生态适宜性评价是探讨区域生态环境问题形成的基础,可为制定区域生态发展战略提供科学依据<sup>[6]</sup>。

(4) 区域生态协调与生态补偿

区域生态单元内不同生态功能体通过生态介质或人为因素产生联系,导致生态经济产品和生态服务的空间流动,即生态资产的流转<sup>[9]</sup>。因此建立区域生态协调机制、进行生态补偿是区域可持续发展的根本。以流域为例,流域上下游之间的联系十分紧密,通常为上游向下游提供清洁的水资源,但当上游受污染后,则向下游排放污水。因此,如何建立区域协调机制对保障整个流域健康发展至关重要,区域生态补偿是建立区域协调机制的重要手段<sup>[28]</sup>,通过建立生态补偿机制,能有效平衡生态区域内不同功能体之间或不同生态单元之间的利益关系,是实现不同区域间生态与经济协调发展的重要手段。

1.3 区域生态学的核心目标

区域生态学研究既关注生态区域内各个生态功能体之间生态与经济的协调发展,也关注不同生态区域之间的协调发展,其最终目的是为实现区域可持续发展提供理论支撑。因此,服务于人类社会的可持续发展是区域生态学研究的最终目标<sup>[29-30]</sup>。

1.4 区域生态学的研究尺度

对区域生态学而言,研究的尺度在很大程度上取决于生态介质的扩展范围和不同生态区域的环境状况。从空间尺度上来说,区域生态学的研究重点为中观尺度和局地尺度,从国家视角和地区视角研究区域综合体内部和区域之间的生态分异与生态联系等。区域生态学的主要研究对象是地球上各种类型或不同尺度的区域综合体,是位于生态系统生态学和景观生态学之上、全球生态学之下的生态学子学科,居于较高的层次<sup>[31]</sup>(图2)。

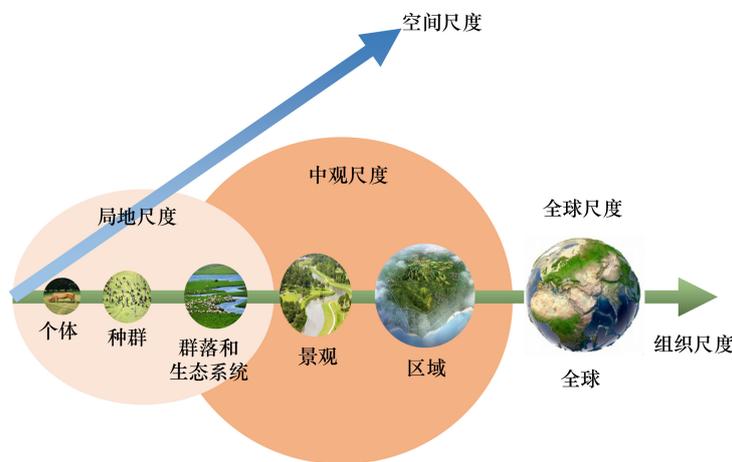


图2 区域生态学的研究尺度

Fig.2 Research scale of regional ecology

2 区域生态学与流域可持续发展

2.1 基于区域生态学的流域生态学研究对象和内容

(1) 定义

流域在地理学中,是指一条河流(或水系)的集水区域,是具有水文功能的连续体<sup>[20]</sup>,是最为典型的生态

区域。根据区域生态学的理论和方法,流域生态学是以水为串联介质,研究生态功能体之间物质、能量、信息等流动规律,以及自然要素与经济、社会等人文要素耦合发展的学科<sup>[32]</sup>。

### (2) 研究尺度

流域具有清晰的等级结构,这种等级结构赋予它们灵活的尺度,因此流域面积可以为几十万 km<sup>2</sup>的大流域,也可以是几百 km<sup>2</sup>的小流域。流域生态单元(生态功能体)的划分是根据一定目的和要求,基于产汇流机理,按照研究尺度和相应的自然分水线将整个流域划分成不同子区。流域生态单元主要基于特定流域生态尺度来建立,不同尺度上的划分结果构成逐级嵌套的等级体系,具有空间尺度效应。在相对大的空间尺度上,流域生态单元的划分要体现生态单元之间的差异;在相对小的空间尺度上,要体现生态单元内部结构和功能的差异<sup>[9]</sup>。

### (3) 研究对象

从区域生态学的角度,一个完整流域的生态供体多为自然生态要素,主要包括水源涵养功能体、水土保持功能体、洪水调蓄功能体、水环境净化功能体、生物多样性保育功能体等。流域生态受体多为经济社会要素,通常表现为人类聚集、经济发达的生产生活功能体,构成该功能体的多为经济社会要素,在纵向上主要包括各级城镇体系,在横向上则包括工业、农业、交通、行政以及居住区等功能区块。在流域上游源头区,海拔较高,地势陡峻,林草覆被好,野生动植物资源丰富,人类活动胁迫较少,生态系统稳定性较高,通常作为水源涵养、水土保持和生物多样性保育功能体,具有供体特征。中游海拔次高,多湖泊湿地和农田,有零星城镇分布,以农业为主导产业,通常湖泊湿地作为洪水调蓄功能体,河湖周边的林草缓冲带作为污染物净化功能体,城镇作为人居保障功能体,农田作为农产品提供功能体,中游兼有供体和受体的特征。下游海拔最低、地势平缓、交通发达、城镇密集,为人类集中聚居区或城市群,是流域经济最为发达的地区,以工业和服务业为主导,也有一定比例的农田,通常作为城镇与产业发展功能体、农产品提供功能体等,具有受体特征。水为联系供体和受体的生态介质,通过水循环以及伴生的土壤营养物将上中下游连接成为一个有机整体,使得整个流域中的环境、社会与经济等众多过程连结起来,形成一个系统性极强、整体性极高、协同性密切的生态域。

### (4) 流域生态供体-受体耦合

根据区域生态学的供体-受体双耦合理论,不仅流域中各自然和人文要素间联系十分密切,而且干支流、上中下游、左右岸之间相互联系、相互制约、相互影响<sup>[33]</sup>。流域受体的主要对象能够得以持续稳定发展,与流域各种生态供体提供的生态产品和生态服务紧密相关,正是由于上游和中游水源涵养、水土保持、洪水调蓄和水环境净化等功能体的作用,下游生态受体才能通过介质传输,享有充足清洁的水源,避免河湖和水库泥沙淤积以及富营养化,减少洪灾损失等。

### (5) 流域生态系统结构、过程与功能

基于区域生态学,健康的流域应具有结构完整性、过程连续性和功能一体性。流域生态结构的完整性表现在特定时空尺度下,内部生态功能体类型的齐全和相互之间的有机配置,流域格局完整性越高,其稳定性越好。流域生态过程连续性,表现在水流动时发生的泥沙和营养物的迁移、积累,以及陆地坡面与水域之间的物质与能量交换等生态过程连续通畅,上游供体为下游受体提供生态功能,没有阻碍。流域生态功能则是流域生态格局和生态过程相互作用的结果,人类经济社会获得生态产品和生态服务、满足人类福利的基础。流域生态格局—过程—功能—服务是环环紧扣、紧密联系的统一的研究体系,一个环节发生变化,其他环节均会有不同程度的响应。

## 2.2 我国流域可持续发展面临的主要区域生态问题

随着人类不合理的开发和利用,我国流域内生态格局破坏、生态过程被人为扰乱、生态功能下降、地-地耦合失调、人地关系紧张。基于区域生态学的视角,分析了我国流域可持续发展过程中面临的主要生态问题。

### (1) 生态格局遭到破坏,影响了生态过程和生态功能

区域生态学重视生态格局的完整性研究,流域生态功能体类型越齐全、结构越合理、格局越完整,流域内

部的稳定性就越好。但流域内森林采伐、围湖造田、湿地破坏等不合理的人类干扰,改变了生态要素类型、结构和格局,使得我国流域内原本合理的生态空间格局被破坏,进而影响整个流域生态过程的连续和生态功能的稳定,引发一系列生态问题,表现为植被退化、湖泊萎缩、水土流失加重、洪涝与旱灾频繁、水污染加剧等。如长江中上游由于过度放牧、陡坡地开垦、森林植被砍伐和湖泊湿地围垦等不合理的人类活动,流域内生态安全格局受到威胁,上中下游区域之间的协调被打破,并最终成为 1998 年特大洪水灾害的重要原因之一<sup>[9]</sup>。

#### (2) 生态过程被人为扰乱,带来了较大的生态风险

流域通过水循环把许多生物过程、物理过程和化学过程连结起来,只有保持生态过程的连续,上游供体为下游受体提供的生态功能才没有阻碍。但为了获得稳定的水资源供给,我国通过在流域内兴建水库、抽采地下水、实施流域之间的引水工程等,虽然一定程度上减轻了严重洪水和持续干旱给人类带来的生态环境灾难,提供了供水、发电、灌溉、水产、航运等多种服务功能<sup>[9]</sup>,但这些人类水资源的工程措施往往也人为地阻断了流域内部的水文过程,导致流域中水量平衡失调、水文调节功能下降,对我国流域对环境或生态过程有负面的影响。有些流域无序建设水电站,上游的水量被截留,导致下游入境水量减少且单一化;同时开挖的弃土、废渣直接倾倒或堆放在河道,给泥石流、滑坡的形成提供了很好的物质条件,一旦有强降雨,就可能诱发地质灾害。如黑河下游的额济纳绿洲是西北地区重要的生态防线,但从上世纪 60 年代以来,由于中游工农业的发展和水利工程建设,中游来水量逐年锐减,有些季节甚至出现断流现象,使得本就气候干旱、降水稀少的额济纳绿洲的生态环境逐渐恶化<sup>[34]</sup>。

#### (3) 生态功能下降,生态退化和环境污染严重

健康的流域除了需要格局完整性和过程连续性,更要注重维持流域生态健康和安全所需要的多种功能的匹配。但由于过度开发和生态破坏,我国流域生态功能下降,影响了可持续发展。如黄河流域是我国西北和华北地区的重要生态安全保护屏障,但黄河上游地区水源涵养功能退化严重,重要的水源补给地出现草地退化、沙化和盐碱化等现象<sup>[35]</sup>;中游黄土高原地区水土保持功能下降,水土流失的强度和治理难度都在增大,水土流失的防治形势比较严峻;下游受到大型水利工程调蓄以及上中游地区工农业生产对水资源开发过度的影响<sup>[33]</sup>,入境水量越来越少,洪水调节功能和污染净化功能下降,造成洪灾频发、水污染严重,给下游地区的经济可持续发展造成了严重影响<sup>[36]</sup>。

#### (4) 缺乏整体保护和系统开发理念,流域地-地耦合失调

生态区域中生态供体与生态受体在空间上互相耦合,无论哪一区域或任何一个环节出现问题,比如水资源枯竭或者被污染,必将影响到整个流域的生产、生活和生态环境,地-地耦合是流域持续稳定发展的基础。如果缺乏流域生态思想的指导,流域中任一生态功能体发生的变化,均会通过水的连接作用将这一变化扩散到其他生态过程和生态功能体。例如工业区污染物排放不仅直接造成水质下降,进而影响到水生生物、旅游和人类健康等方面。又如我国流域上游供体遭到强烈的人类干扰和过度开发,林草遭到破坏,通过生态介质和生态过程,进而影响生态受体生态结构的完整性和功能一致性,导致中下游河湖和水库水质下降、河道导流能力降低、洪峰流量增加从而诱发水灾等,流域上中下游之间原来合理的生态涵养区、调蓄区、居住区域在空间配置上失衡,从而引起地-地耦合失调<sup>[37]</sup>。

#### (5) 脆弱的生态环境和过度的资源开发之间矛盾突出,人-地关系紧张

流域是一个由自然要素和人文要素构成的复合系统,具有适合生产生活所需的自然环境和各种资源,因此资源开发力度普遍较强。但与此同时,我国很多流域生态环境较为脆弱、水资源严重短缺、水土流失严重,生态环境遭受严重威胁,造成了自然资源承载能力和资源供应力达不到发展的速度和要求,开发与生态保护矛盾突出。如黄河流域 GDP 占全国约 14%、人口占全国 12%、耕地占全国 15%,但径流量仅占全国的 2%,人均水资源占有量仅相当于全国人均水平的 18%<sup>[38]</sup>,目前的供水量已经远远超过黄河水资源的承载能力,并且受城镇化和产业化发展的影响,该态势还将进一步加剧<sup>[26]</sup>。

### 3 基于区域生态学的流域可持续发展应对策略

本文基于区域生态学理论及方法,针对我国流域可持续发展中面临的主要区域生态问题,提出了流域可持续发展的应对策略。

#### 3.1 坚持流域生态格局-过程-功能协调发展

系统分析我国流域内地理环境特征,梳理其主要生态问题,识别流域内分水岭、集水区域,打破行政界线,考虑流域内的山水林田湖草沙等生态要素结构完整性、水循环过程、上游山林对下游影响范围与强度等,构建流域山水林田湖草沙的一体化治理空间格局。坚持生态优先的原则,实施山水林田湖草沙综合治理,对流域中受到破坏的生态空间进行生态修复,宜林则林,宜草则草,构建要素齐全、结构完整、空间稳定的流域格局,为生态功能的发挥奠定良好的基础。减少工业、农业和生活对水体的污染,减少阻断流域的人类活动,保证生态过程连续,确保上游供体能畅通地为下游受体提供生态功能。

#### 3.2 整体谋划、系统保护、协同治理,实现流域间的地-地耦合

利用区域生态学的理论和方法,构建流域水陆统筹、江-湖-海联动、山水林田湖草沙生命共同体,对我国流域进行整体性谋划、系统性保护、协同性治理,实现流域间的地-地耦合。从流域全局视角出发,从系统的视角如生态系统、经济系统、社会系统、人与自然协调发展等角度对全流域进行全盘规划<sup>[24]</sup>,坚持不同生态区域一体化保护和环境污染协同治理的理念,综合谋划我国流域上下游、左右岸、岸上岸下的整体系统治理方案,实施山水林田湖草沙综合治理,形成上游生态稳固、中下游生态宜居的生态安全格局<sup>[35]</sup>。

根据流域不同的保护重点,进行分区分类治理。上游地区由于地势较高、林草资源丰富,具有较高的水源涵养和水土保持功能,一般在上游生态系统质量较高的山林、草场等区域设置生态功能保护区,不搞大开发,稳步提升上游生态系统稳定性。中游地区面临水土流失等问题,湖泊湿地较多,一般需要加强水土流失综合治理,退耕还草、退耕还林,种植与当地气候条件相适宜的植被,保障河道生态过程连通性,维护其调蓄洪水能力。下游地区地势平坦,是人类集中聚居区或城市群,主要功能为生产生活功能,面临较为严重的水污染和洪水灾害风险,要减少污染物排放,在破碎化严重、功能退化的区域进行系统修复,做好河堤加固和维护,保障防洪安全。

流域的可持续发展需要不同区域间的相互协调,需要以协同进化的思想开展各项治理工作,建立流域内跨区域、多部门的协同治理机制,切实加强全流域联防联控、共保共治、联合执法,持续推动由低级协同向高级协同演进,促进流域的均衡、绿色发展<sup>[39]</sup>。

#### 3.3 构建与生态承载力相适宜的人居环境和产业结构,实现流域人-地耦合协调

流域是一个涉及社会-经济-自然的复合生态系统<sup>[32]</sup>,人-地耦合是地球系统科学和区域生态研究的核心领域,是流域可持续发展的重要理论基础<sup>[40]</sup>,只有当流域生态系统的“供”与经济社会发展的“需”达到平衡时,才能实现人-地耦合协调发展。

利用区域生态学的理论和方法,一方面根据生态供体提供的生态功能,构建与生态服务相适宜的人居生态环境,开展流域人居适宜性、产业结构适宜性、产业布局适宜性等生态适宜性评估。另一方面根据流域自然环境特征、资源禀赋、环境容量以及社会经济发展需求,综合进行生态承载力评估,确定与资源禀赋和环境条件相适宜的产业经济发展规模和密度,逐步建立与我国生态承载力相适应的产业结构,通过结构调整控制生态破坏与环境污染,构建集约型、循环型、质量型产业发展方式,优化产业布局,引导区域空间的合理发展,促进人地关系进入良性循环。

#### 3.4 建立生态补偿机制,实现流域生态资产合理流转

流域是整体性极强的自然区域,流域内各自然要素的相互关联极为密切,地区间影响明显,特别是上、中、下游地区之间在生态环境整治、经济开发上存在的实施主体与受益主体不一致的矛盾十分突出。通过建立流域生态补偿机制,从资源“供”、“需”角度出发,确定我国流域内资源流转的供体与受体,科学有效评估供体与受体的资源能源和生态经济产品产出量及其经济价值,实现我国流域生态经济产品和生态服务等生态资产在

不同功能体之间或不同生态区域间的合理流转,实现流域内各区域或生态功能体的共赢和共享,从而促进我国全流域的社会经济可持续发展。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Pace M L, Gephart J A. Trade: a driver of present and future ecosystems. *Ecosystems*, 2017, 20(1): 44-53.
- [ 2 ] Palmer M, Bernhardt E, Chornesky E, Collins S, Dobson A, Duke C, Gold B, Jacobson R, Kingsland S, Kranz R, Mappin M, Martinez M L, Micheli F, Morse J, Pace M, Pascual M, Palumbi S, Reichman O J, Simons A, Townsend A, Turner M. Ecology for a crowded planet. *Science*, 2004, 304(5675): 1251-1252.
- [ 3 ] Crutzen P J, Stoermer E F. The "anthropocene". *IGBP Newsletter*, 2019, 41: 16-18.
- [ 4 ] United Nations. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Division for Sustainable Development Goals; New York NY USA. 2015, <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- [ 5 ] Mitsch W J, Day J W. Thinking big with whole-ecosystem studies and ecosystem restoration—a legacy of H.T. Odum. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1/2): 133-155.
- [ 6 ] 高吉喜. 区域生态学核心理论探究. *科学通报*, 2018, 63(8): 693-700.
- [ 7 ] Kates R W. What kind of a science is sustainability science? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(49): 19449-19450.
- [ 8 ] 樊杰, 周侃, 孙威, 陈东. 人文——经济地理学在生态文明建设中的学科价值与学术创新. *地理科学进展*, 2013, 32(2): 147-160.
- [ 9 ] 高吉喜. 区域生态学. 北京: 科学出版社, 2015.
- [ 10 ] Schneider D C. The rise of the concept of scale in ecology. *BioScience*, 2001, 51(7): 545.
- [ 11 ] 任美镔包浩生. 中国自然区域及开发整治. 北京: 科学出版社, 1992.
- [ 12 ] Brown J H, Maurer B A. Macroecology: the division of food and space among species on continents. *Science*, 1989, 243(4895): 1145-1150.
- [ 13 ] Brown J H. *Macroecology*. Chicago: University of Chicago Press, 1995.
- [ 14 ] 彭宗波, 蒋英, 蒋菊生. 区域生态学研究热点及进展. *生态科学*, 2012, 31(1): 92-97.
- [ 15 ] Fei S L, Guo Q F, Potter K. Macrosystems ecology: novel methods and new understanding of multi-scale patterns and processes. *Landscape Ecology*, 2016, 31(1): 1-6.
- [ 16 ] Jiang Y Y, Rocha A V, Rastetter E B, Shaver G R, Mishra U, Zhuang Q L, Kwiatkowski B L. C-N-P interactions control climate driven changes in regional patterns of C storage on the North Slope of Alaska. *Landscape Ecology*, 2016, 31(1): 195-213.
- [ 17 ] Hutyrá L R, Yoon B, Alberti M. Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization: a study of the Seattle, WA region. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 783-797.
- [ 18 ] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [ 19 ] 陈利顶, 吕一河, 赵文武, 卫伟, 冯晓明. 区域生态学的特点、学科定位及其与相邻学科的关系. *生态学报*, 2019, 39(13): 4593-4601.
- [ 20 ] 尚宗波, 高琼. 流域生态学——生态学研究的一个新领域. *生态学报*, 2001, 21(3): 468-473.
- [ 21 ] 高吉喜, 范小杉, 陈雅琳, 陈艳梅, 田美荣, 吕世海, 冯朝阳, 王小亭. 区域生态资产评估——理论、方法与应用. 北京: 科学出版社, 2013.
- [ 22 ] 高吉喜. 区域生态学基本理论探索. *中国环境科学*, 2013, 33(7): 1252-1262.
- [ 23 ] 潘家华. 以习近平生态文明思想为指导建设美丽中国. *光明日报*, 2019-03-26(5).
- [ 24 ] 张贡生. 黄河流域生态保护和高质量发展: 内涵与路径. *哈尔滨工业大学学报: 社会科学版*, 2020, 22(5): 119-128.
- [ 25 ] 樊杰, 王亚飞, 王怡轩. 基于地理单元的区域高质量发展研究——兼论黄河流域同长江流域发展的条件差异及重点. *经济地理*, 2020, 40(1): 1-11.
- [ 26 ] 刘晓琰. 黄河流域生态保护和高质量发展协调推进的策略分析. *科技创新与生产力*, 2021(11): 32-33, 38.
- [ 27 ] 高吉喜, 吴丹, 张琨, 林乃峰, 邹长新. 基于供体受体关系的大尺度水源涵养生态保护红线划定技术方法及应用. *环境生态学*, 2019, 1(4): 1-7, 14.
- [ 28 ] 丁四保. 主体功能区的生态补偿研究. 北京: 科学出版社, 2009.
- [ 29 ] 陈百明. 华北山区资源开发与经济发展研究. 北京: 中国农业科技出版社, 1996.
- [ 30 ] 刘燕华, 李秀彬. 脆弱生态环境与可持续发展. 北京: 商务印书馆, 2001.
- [ 31 ] Forman R. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. London: Cambridge University Press, 1997.
- [ 32 ] 蔡庆华. 长江大保护与流域生态学. *人民长江*, 2020, 51(1): 70-74.
- [ 33 ] 张济世, 康尔泗, 赵爱芬, 蓝永超, 陈仁升. 黑河中游水土资源开发利用现状及水资源生态环境安全分析. *地球科学进展*, 2003, 18(2): 207-213.
- [ 34 ] 黄燕芬, 张志开, 杨宜勇. 协同治理视域下黄河流域生态保护和高质量发展——欧洲莱茵河流域治理的经验和启示. *中州学刊*, 2020(2): 18-25.
- [ 35 ] 王金南. 黄河流域生态保护和高质量发展战略思考. *环境保护*, 2020, 48(S1): 18-21.
- [ 36 ] 汪芳, 安黎哲, 党安荣, 韩建业, 苗长虹, 王静, 张广汉, 赵勇. 黄河流域人地耦合与可持续人居环境. *地理研究*, 2020, 39(8): 1707-1724.
- [ 37 ] Pusch M, Hoffmann A. Conservation concept for a river ecosystem (River Spree, Germany) impacted by flow abstraction in a large post-mining area. *Landscape and Urban Planning*, 2000, 51(2/3/4): 165-176.
- [ 38 ] 郭晗. 黄河流域高质量发展中的可持续发展与生态环境保护. *人文杂志*, 2020(1): 17-21.
- [ 39 ] 陈耀, 张可云, 陈晓东, 廖元和, 宋丙涛, 黄寰, 王喜成. 黄河流域生态保护和高质量发展. *区域经济评论*, 2020, (1): 8-10.
- [ 40 ] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 程昌秀, 李琰, 冯晓明, 刘焱序. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 504-509.