

黄河流域生态系统变化及其生态水文效应

王艳芬^{1*} 陈怡平² 王厚杰³ 吕一河⁴ 郝彦宾¹ 崔骁勇¹ 王玉哲¹ 胡容海¹ 薛凯¹ 傅伯杰⁴

摘要

黄河流域是连接青藏高原、黄土高原和华北平原的生态廊道，也是我国“一带一路”建设的重要经济廊道，对国家的经济社会发展和生态安全都具有重要意义。受气候变化和人类活动影响，近几十年来黄河流域生态系统的结构和功能发生了巨大变化，流域生态系统的健康受到威胁。然而，目前仍缺乏对黄河流域生态系统在流域尺度上的整体性研究，对其完整性、连通性和脆弱性的系统研究不足，难以有针对性地提升变化环境下的生态系统服务与生态屏障效应。围绕黄河流域生态保护与高质量发展的重大战略需求，我们认为应从流域整体性出发，通过构建黄河流域生态系统类型及空间格局数据集，分析黄河流域生态水平衡分量的格局变化规律，解析并量化表征气候变化和人类活动与生态系统变化之间的关联；基于多源数据集以及生态水文模型，解析黄河流域生态系统的时空格局变化和生态水文过程，并以此建立关键生态系统服务的定量评估指标体系，揭示关键生态系统服务供给能力的格局特征和空间流动及变化趋势，开展生态系统服务格局特征与空间流动时空变异的归因分析；阐明生态系统结构—过程

一服务的级联效应，提出生态屏障功能的优化提升方案，为黄河流域生态治理与管理提供科技支撑。上述研究对完善和丰富地球系统科学具有重要的理论和现实意义。

关键词：黄河流域；生态水文；生态系统服务；生态屏障

1 研究意义

黄河流域是连接青藏高原、黄土高原和华北平原的生态廊道，也是我国“一带一路”发展的重要经济廊道，是覆盖和辐射东、中、西部省区经济社会发展的重要纽带。因此，维持黄河的健康对国家经济社会发展和生态安全都具有十分重要的作用^[1]。受气候变化和人类活动影响，黄河流域的生态环境发生了剧烈变化，改变了生态系统的结构和功能，威胁着流域生态系统健康。黄河源区是重要的水源涵养区，提供了黄河约 60%的径流量，虽然从 2005 年起国家就在黄河源区开展生态保护，但是长期以来其水源涵养能力减弱的局面未得到根本性扭转^[2]。黄河中游穿越黄土高原，是全球水土流失最为严重的区域之一，也是黄河泥沙的主要来源。自退耕还林还草工程实施以来，黄土高原 88.2%的面积植被恢复成效明显^[3]，有效控制了水土流失和入黄泥沙量。然而，在植被恢复的同时，局部地区出现了土壤干化和生态系统退化等问题。同时，入黄泥沙量迅速减少不仅影响了下游工农业生产，也对下游河道和河口三角洲生态系统的结构和功能产生了严重影响，

导致黄河三角洲盐水入侵加剧，海岸线持续后退，三角洲不断萎缩，威胁河口区域生态安全。因此，揭示黄河流域生态系统变化的格局及其驱动机制，界定黄河源区水源涵养量阈值、黄土高原退耕还林还草工程的生态水文阈值和维持海岸线及河口湿地生态平衡的水沙量，维持和提升黄河流域水源涵养和水土保持等重要生态屏障功能，对实现黄河流域生态保护和高质量发展、支撑国家重大决策具有重要意义。

黄河流域主要处于干旱半干旱区，对环境变化敏感。基于流域整体性和连通性，系统研究黄河流域生态系统变化格局及其生态水文效应，揭示其脆弱性，阐明变化环境下流域生态系统结构—功能—服务的级联效应，对完善和丰富地球系统科学具有重要的理论和现实意义。黄河作为世界第五大河流，有着不同于其它大型河流的特点：如海拔落差大，东西跨越半湿润区、半干旱区和干旱区等多个气候区，穿越全球最大、最深厚的黄土区，生态系统脆弱，自然和社会经济条件异质性大等。特别是近年来在气候变化和人类活动的耦合影响下，流域生态系统结构、功能、水资源特征等发生了显著变化^[4]，严重影响流域的完整性、连通性和流域生态系统健康。从流域完整性角度来看，研究生态系统变化及其生态水文效应，集成完善流域生态系统格局—过程—服务模型，是大河流域可持续发展管理的研究热点和前沿科学问题^[5]。因此，以黄河流域为研究对象，研究其生态系统变化及驱动机制，阐明变化环境下流域生态系统结构—功能—服务的级联效应，深

入理解流域的完整性、脆弱性和流域系统管理的关系，可以为黄河流域生态治理与管理提供科技支撑，也可以为世界同类河流治理与管理提供科学借鉴。

2 研究现状

2.1 黄河流域生态系统变化及其驱动机制

大河流域生态系统变化与健康是地球表层系统科学与生态学综合研究的科学前沿，从流域整体视角开展大河流域生态系统变化的研究刚刚起步。相比于世界其它主要大河，黄河流域生态系统类型更为复杂，也是全球人类活动最为强烈的地区之一，而且上中下游的气候、地理、生态及社会经济条件相差极大。目前，在流域尺度尚缺乏对黄河流域生态系统变化格局及其驱动机制的整体性研究。

自 2000 年以来国家在黄河源区实施了大规模的生态保护与恢复工程，辅以人工增雨，有效提高了源区生态系统的水源涵养能力^[6]，但是草地退化与水源涵养能力不足的局面尚未根本好转^[2]。目前对草地退化、恢复和生态保护的研究多集中在局部地区的典型草地类型上，主要关注恢复措施对植被盖度、生物量、群落中优质牧草比例的影响，缺乏对生态工程和气候变化影响植被变化的驱动机制研究。

黄河中游处于生态环境十分脆弱而又承受着高强度人类活动压力的黄土高原地区，是全球水土流失最严重的区域之一。自

1999 年退耕还林还草工程实施以来，黄土高原 62% 的区域呈现植被恢复态势，植被覆盖度由 31.6% 提高到 2017 年的 65%^[7]，成为全国植被恢复效果最显著的地区^[8]。与此同时，在区域植被持续增绿的过程中，植被蒸腾导致土壤水分不断消耗，植被恢复的可持续性面临威胁^[9]。一些地区人工生态林营建不合理，过度追求人工林草的高经济效益，出现了土壤干化和植物群落生长衰退的现象^[10,11]。同时，黄土高原现有林草覆盖率已达 63%，其耗水接近该地区水分承载力阈值，不合理的人工林建设对区域水文循环和社会用水需求造成不利影响^[9]。维持植被恢复及其生态效益的可持续性已成为黄土高原生态恢复与重建面临的新挑战，目前缺乏对大规模植被恢复驱动下生态系统结构、功能变化机理的深入研究，难以为未来生态建设格局优化提供支撑。

黄河三角洲和河口湿地是由中游泥沙输入沉积而成，水沙不仅控制着河口湿地面积消长和结构变化，而且为黄河下游湿地发展和生物多样性维持提供了物质和能量^[12]。近年来，由于小浪底水库对黄河下游的调水调沙动力不足，导致河道冲刷效率明显降低，黄河下游湿地植物和水生生物健康状况显著下降^[13]。与 1990 年相比，2010 年河口三角洲湿地面积减少了 39.4%^[14]。2002 年黄河实施水沙调控措施后，入海泥沙通量增加，泥沙粒度粗化，现行河口的淤积速率快速增加，河口湿地由蚀退状态转为缓慢淤积状态^[15]。河口湿地的有机碳以陆源地表径流输入和湿地植被贡献为主，有机碳的来源有明显的时空变化并且受到人类活动的强烈干

扰，流域水沙调控和湿地保育引起河口沉积特征与生源要素迁移不断调整。在水沙调控的新形势下，目前缺乏对未来河口湿地沉积地貌演化规律和湿地植物群落演变规律的探索。

2.2 黄河流域生态系统变化的生态水文效应及其调控机制

黄河流域跨越中国三大自然区，气候、地质、地貌、土壤、植被和水文状况差异巨大，导致黄河流域的生态水文特征也具有显著的空间差异。黄河源最重要的植被覆盖是草地，特殊的地理位置和地形地貌使得黄河源对气候变化极其敏感。在气候变化影响下，黄河源区的降水、气温和径流等关键气候水文因子发生了很大变化，气温上升导致区域蒸散发增强、冰雪消融增多和冻土层退化，使草地呈现斑块化、破碎化和分散化的退化特征，从而降低了水源涵养能力，改变了地表水热平衡，导致地下水位降低，并进一步降低产流。黄土高原既是世界上水土流失最严重的地区，也是我国开展水土保持和生态建设的重点地区，大规模的退耕还林还草工程在提升该区植被覆盖度的同时，导致植物耗水接近该地区水分承载力，而土壤侵蚀强度显著下降的同时，也导致向下游输沙量大幅减少。黄河向河口的输沙能力及其对下游河道安全和湿地健康的维持，需要通过小浪底水库调控下游水流量和泥沙量。黄河中上游水沙量的变化，对小浪底水库的水沙调控能力及下游河道与河口湿地生态安全有着重要影响。近年来，小浪底水库单库调水调沙后续动力不足，河道冲刷效率明显降低，黄河下

游湿地植物和水生生物健康状况显著下降，河口三角洲湿地面积显著减少。

生态水文过程是控制生态系统水分利用与产流产沙的核心过程，包括了能量、水分、碳、养分及其它物质的流动和输移过程。气候变化和人类活动既可以直接影响生态水文过程，又可以间接影响水分代谢关系而引起生态系统的变化，进而改变流域的生态水文过程。解析气候变化和人类活动影响下生态系统变化与流域水文过程变化之间的互馈关系，是流域生态系统管理研究的重点和难点^[16]。

在过去 20 年间，为应对人类活动引发的流域生态退化和全球环境变化，生态水文研究取得了巨大发展。但是由于生态系统受到人类活动的持续影响，生态水文过程极其复杂，当前学界的认识还不完善^[16]。在干旱和半干旱区，虽然从个体生理到群落、生态系统乃至流域尺度对微生物、植物的碳水关系开展了丰富的实验观测和模型模拟研究，但是认识仍然有限，缺乏跨尺度碳、水互馈机制，基于小尺度的精细研究，无法准确预测大尺度碳、水过程和环境变化的生态水文效应^[17]。

生态系统对水资源的调节和供给能力强烈依赖于水循环中的三个关键连接点，即地表入渗、根层水分去向和由蒸散决定的水分分配^[18]。对于干旱、半干旱乃至半湿润生态系统，其水分绝大部分通过蒸散消耗，对于草地生态系统该比例可达 95%^[19]，在黄土高原地区也大于 90%^[20]，因而蒸散及其组分分配是水循环的重要

枢纽。在蒸散中降低地表蒸发的损失，而提高植物蒸腾耗水的比例，可在不减少液态水资源的同时，提升生态系统生产力及其它生态服务功能。然而，当前在水资源和生态系统管理中，通常只关注液态水，而忽视了对气态水分配的管理^[21]。

气候变化直接影响蒸散及其组分分配，植被变化通过改变下垫面地形地貌条件、植被覆盖面积、土壤理化性质、植物水分吸收和利用效率等影响土壤入渗、根层水分去向和蒸散，进而影响流域的径流量、洪水过程及地表和地下水资源的补给^[22]（图 1）。黄河流域大部分区域处在干旱半干旱区，水循环、生产力及其相互关系一直是研究的热点，尤其是降雨、蒸散和土壤水分变化等联结水文和生产力形成的关键环节以及植被变化影响生态水文过程的机制^[10, 23-25]。已有研究表明，多种农作物以及不同年龄经济树种的水分吸收和利用等特征不同，不同植物和植物群落在水分吸收节律、利用效率和年需水总量上也相差巨大。目前研究多集中于区域内典型生态系统或者小流域，关注植物—土壤格局变化对生态水文过程的影响，缺少流域尺度上的整体性和系统性研究，未能有效揭示植被变化对蒸散及其组分分配等关键环节的生态水文效应，也未能充分刻画人类调控管理措施的影响。

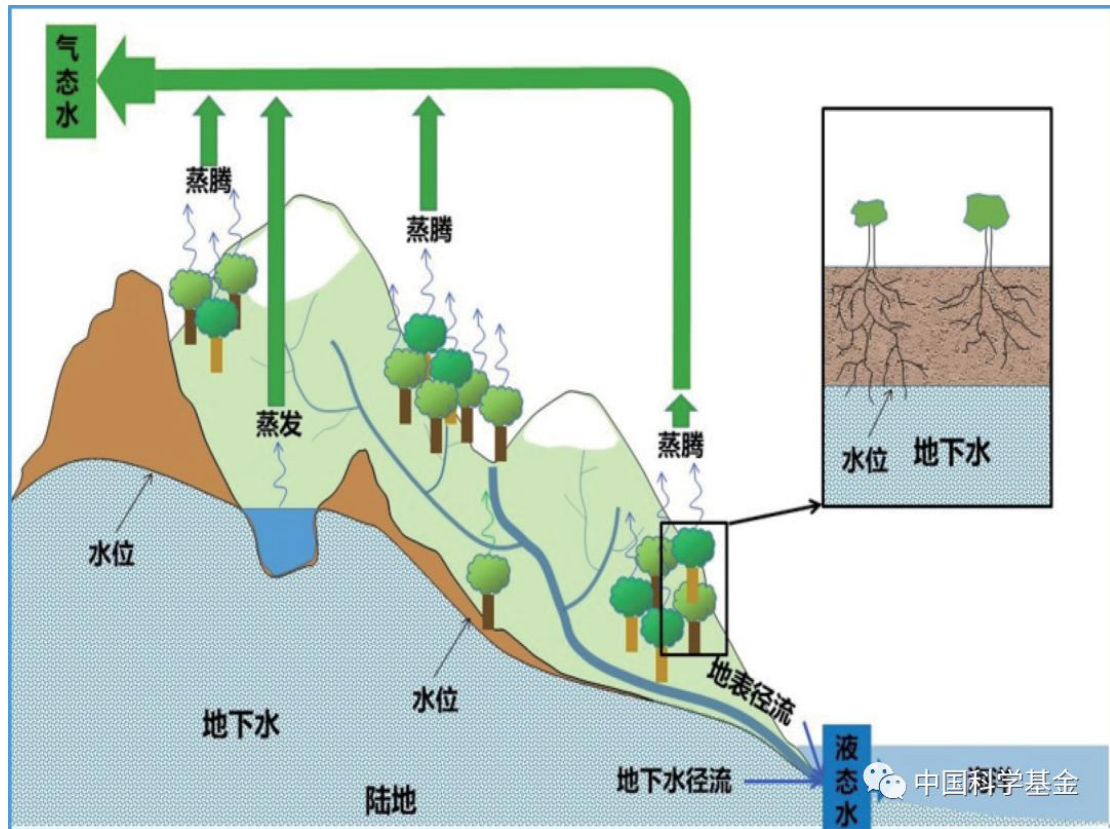


图 1 水循环基本路径（修改自^[28]）

近年来国内外研发了两类流域生态水文模型，一是利用区域历史或者遥感数据，基于植被特征和水文过程的相关性，建立统计模型或者遥感估算模型，这类模型并未考虑二者之间的互馈机制，不适用于大型流域^[26]；另一类模型考虑了植被的影响或者将植被生态模型嵌入到水文模型中，实现了植被生态—水文交互作用的双向耦合模拟^[27]，其缺陷主要在于对植物生长和植被—水文相互作用的机理考虑不够，对植被动态过程与水文过程的耦合以及水循环相伴的物质循环的模拟能力不足。由于下垫面条件、水文参数等的时空变异性，不同时空尺度的生态水文过程存在差异，基于小尺度研究建立起来的模型并不能直接应用于中、大尺度的流

域生态水文过程模拟中。在各种空间尺度上，水文循环的准确描述缺乏关键环节的定量参数，上述两类模型的尺度转换问题仍然悬而未决，限制了大流域空间模型的发展。

2.3 黄河流域上中下游的生态系统服务

生态系统服务是近 20 年来地理学和生态学综合交叉研究的一大热点和前沿领域，在理论框架搭建、定量评估和模型发展方面取得了显著进展。然而，面向改善生态管理的需求，生态系统服务科学仍然面临着深化机理研究和强化应用研究的严峻挑战^[29]。在旺盛需求的驱动下，生态系统服务评价和模拟模型也有了很大发展，针对不同的应用导向开发了一系列模型工具，其中综合性模型 InVEST 是目前应用最广泛的模型；而 ARIES 模型则具有一定的人工智能和网络分析功能，应用更为灵活^[30]。在生态系统服务定量化方法发展的推动下，国内外开展了大量不同尺度上生态系统服务定量评估方面的研究^[31]。但是，由于对社会经济复杂性、时空不确定性、多种生态系统服务之间的权衡/协同关系、生态系统服务的空间流动等科学机理的解析还不充分，严重影响了这些研究在实际生态管理决策中的推广应用^[32]。具体到黄河流域，生态系统服务的相关研究在上中下游的局部地区有所涉及^[33]，研究内容包括生态系统服务的物质量和价值量评估、生态系统服务的供需关系及权衡/协同关系定量分析和模拟等，然而更为深入的生态系统结构—功能—服务级联效应研究不足，特别是以整个黄河

流域为研究对象、考虑机理机制和上中下游协同的生态系统服务综合定量研究还鲜有报道。

生态屏障是我国学者面向区域生态系统保护、恢复和管理需求提出的具有鲜明应用导向的生态学概念^[34]。围绕生态屏障这一主题，国内学者主要开展了不同尺度和地域类型的生态屏障区划、规划和监测评价等研究^[35,36]。这些研究主要关注了地表生态空间的地域分异特征、土地利用格局、植被特征以及一定的生态系统服务物质及价值量变化，对空间分异和时间变化的机理研究涉及很少，尚难以有效支撑针对生态屏障管理的科学决策。国际上没有在内涵上与生态屏障直接对应的生态学概念（潘开文等，2004），比较接近的术语是系统保护规划（Systematic Conservation Planning）^[37,38]。近年来，国际上关于系统保护规划研究向更多地整合社会需求的方向发展，将生态系统服务纳入到系统保护规划之中。有关研究表明，纳入生态系统服务之后，可以降低规划体系的成本，提高综合效益^[39]。我国学者的研究也表明，通过纳入生态系统服务，可以完善指标和目标体系，为优化我国的生态保护空间体系提供有力的科学支撑^[40,41]。

3 关键科学问题

针对变化环境下黄河流域生态系统保护与生态屏障功能提升这一重大国家需求，开展多学科、多手段、多时空尺度的综合研究，探索黄河流域生态系统变化的驱动机制、生态系统格局一过

程—服务级联效应及生态屏障功能提升途径，需要回答三个关键科学问题：（1）在气候变化和人类活动影响下，黄河流域生态系统如何变化，生态系统时空分异的驱动机制是什么？（2）黄河流域生态系统变化的生态水文效应调控机理是什么？源区水源涵养、中游退耕还林还草及河口水沙调控分别具有怎样的生态阈值？（3）如何揭示黄河流域生态系统格局—过程—服务的级联效应，提升其生态屏障功能？针对以上关键科学问题，下面拟从变化环境下黄河流域生态系统变化及其驱动机制、变化环境下黄河流域生态系统变化的生态水文效应和黄河流域生态系统格局—过程—服务的级联效应和生态屏障功能等三个方面展开讨论（图 2）。

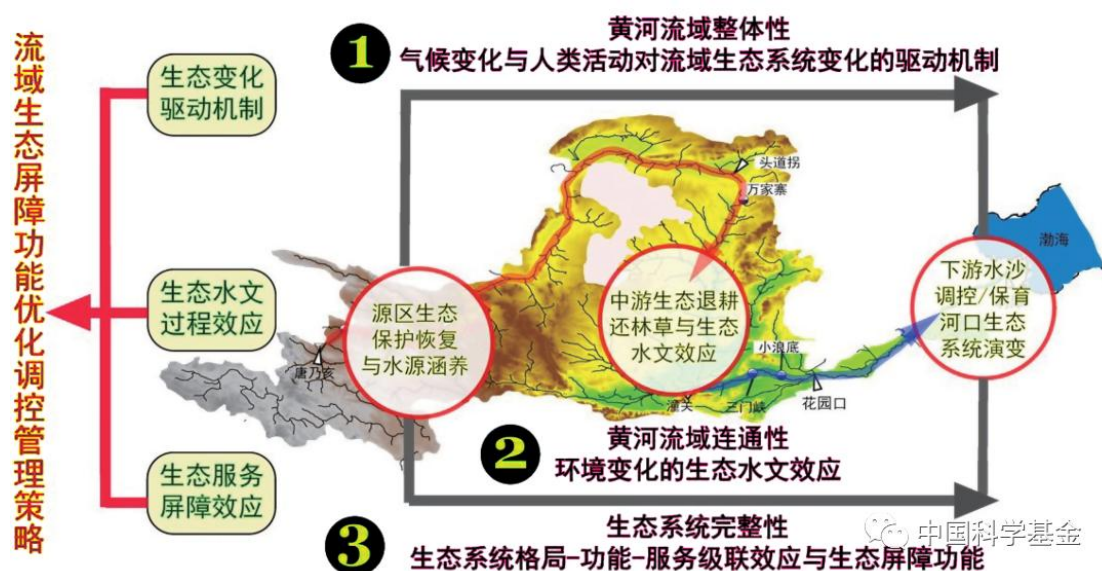


图 2 黄河流域生态系统研究关键科学问题

3.1 变化环境下黄河流域生态系统变化及其驱动机制

黄河流域横跨中国三大自然区，生态系统类型复杂多样，人类活动强烈。准确认识黄河流域生态系统的变化特征和驱动机制有

利于我们全面评估黄河流域生态系统的健康状况，这是地球表层系统科学与生态学综合研究的科学前沿。目前在黄河流域不同地区针对不同生态系统类型已有相关研究，但是尚未形成统筹共识。在气候变化和人类活动影响下，亟需在流域尺度上对黄河流域生态系统变化及其驱动机制进行整体性研究，亟待深化研究区域生态系统变化特征的基础上，解析生态系统变化背后自然和人文耦合作用下的驱动机制。

面对气候变化和人类活动影响下黄河流域生态系统变化及其驱动机制研究，需要从流域整体性出发，构建包括样带调查、定点监测、遥感影像、无人机监测、历史资料、气象和水文观测资料、社会经济资料等多源数据集，基于众源采集、地面观测和多源遥感等数据，充分挖掘黄河流域不同土地覆被类型的光谱、植被、生境、物候等时空信息，采用深度学习方法和云计算平台，开展黄河流域土地覆被类型遥感监测（图 3）。通过构建黄河流域生态系统类型及空间格局数据集，分析黄河流域降水、蒸散、地表径流等生态水平衡分量的格局变化规律，从而解析气候变化、人类活动与生态系统变化之间的关联，并量化表征气候变化与人类活动对生态系统变化的驱动机制。

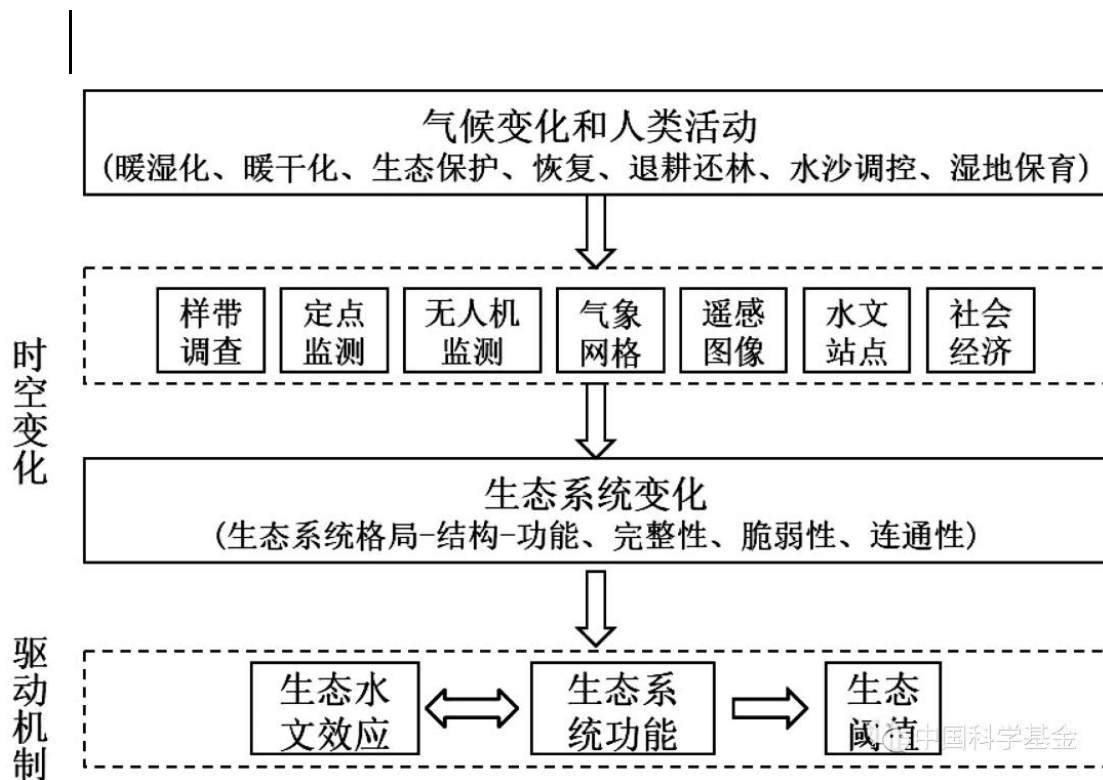


图 3 黄河流域生态系统变化研究框架

3.2 变化环境下黄河流域生态系统变化的生态水文效应

在气候变化和人类活动影响下，生态系统结构、功能与生态水文过程之间的互馈关系是流域生态系统管理研究的热点和难点。然而目前的研究多集中于黄河流域典型生态系统或者小流域，主要关注植物—土壤格局变化对生态水文过程的影响。亟需从流域尺度上开展整体性和系统性的研究，有效揭示植被变化影响蒸散及其组分分配等关键环节的生态水文效应，充分刻画人类调控管理措施对黄河源区、黄土高原和黄河三角洲等典型地区的生态水文影响，发展流域尺度生态水文模型。

黄河源区是重要的水源涵养区，对维持健康的黄河生态流量具有重要的管理价值。虽然 2000 年以来实施了大规模生态保护工

程，但草地退化和水源涵养能力不足的局面仍未好转。在变化环境背景下，需要揭示草地植被与土壤变化间的互馈关系，阐明草地退化及不同恢复措施的生态水文效应，以此界定保障黄河水源涵养需求的草地恢复阈值。

黄河中游生态环境脆弱，人类活动强烈，是黄河泥沙的主要源区。自 1999 年退耕还林还草工程实施以来，黄河中游植被得到了有效恢复，减少了泥沙输入，但水土流失治理面积不足 50%，与此同时有些地区人工林耗水接近水分承载力阈值，亟待深化退耕还林还草后生态系统变化与水土保持的互馈机制、不同地貌类型区典型生态系统的生态水文阈值以及生态建设格局优化方案等问题的研究，为区域生态恢复和生态系统综合管理提供科学支撑。

黄河流域水沙调控导致下游泥沙输入量急剧减少，不但影响下游工农业用水需求，也加剧了黄河三角洲萎缩和海水入侵，使河口生态安全受到威胁。在变化环境下，亟需研究河口湿地生源要素的迁移、转化和生物地球化学过程的响应机制以及下游湿地植物群落的演变过程，并界定维持河口稳定和湿地生态系统可持续性的水沙临界值。

系统研究变化环境下黄河流域生态系统变化的生态水文调控效应与机制，需要集成优化流域跨尺度机理模型，以此提升对流域生态水文效应模拟和预测的准确性。因此，对于流域生态水文模型而言，亟需提高生态过程与水文过程的耦合度，寻找合适的转换尺度，通过模型模拟定量揭示气候变化和人类活动等导致的

植被格局、水循环过程以及生态系统功能的改变，并进行有效的评估。

3.3 黄河流域生态系统格局—过程—服务的级联效应和生态屏障功能

提升黄河流域的生态屏障功能，必须基于生态系统结构—功能—服务级联效应，提出针对各区域的生态系统管理策略。同时，必须基于流域整体性厘清上中下游之间生态系统服务和生态屏障功能之间的关系，协同提升流域整体的生态屏障功能。

生态系统服务是地理学和生态学交叉研究的热点方向，但生态系统服务耦合机制和生态系统结构—功能—服务的级联效应等科学机理研究相对薄弱。目前对黄河流域上中下游的生态系统服务研究有所进展，但缺乏对变化环境下流域整体的系统研究，亟需以黄河流域整体为研究对象，深入研究生态系统结构—功能—服务的级联效应，从机理机制上定量研究黄河上中下游协同的生态系统服务。黄河流域地处干旱半干旱区，水沙问题一直是治理中的关键问题。因此，在生态系统服务方面需要重点考虑生态系统的水文调节与水源涵养、淡水供给、土壤保持与防风固沙服务，面向气候变化的响应和适应以及“碳中和”的政策需求，生态系统的碳固持服务也非常重要。

生态屏障是具有中国特色的生态学概念，目前生态屏障的理论和方法尚待建立和完善，对黄河流域生态屏障功能的研究甚少。

亟需借鉴国际系统保护规划的最新理论与方法进展，把具有中国特色的生态屏障研究与国内外共同关注的生态系统服务前沿和热点进行综合，开展大流域尺度的研究，将会成为极具潜力的创新研究方向。

基于遥感影像、定点监测和样带调查等多源数据集以及生态水文模型，解析黄河流域生态系统的时空格局变化和生态水文过程，以此为驱动建立关键生态系统服务的定量评估指标体系（包括水源涵养与水文调节、土壤保持、碳固持与养分滞留等），结合流域上中下游生态系统结构功能研究和生态保护与修复工程特征，采用遥感和生态系统服务模型相结合的方法，揭示关键生态系统服务供给能力的格局特征和空间流动及变化趋势，开展生态系统服务格局特征与空间流动时空变异的归因分析（图 4）。综合考虑地形、植被、气候等自然因子，人口分布与变化、城乡建设、经济发展等经济社会因素，基于生态系统服务及其耦合关系开展生态屏障功能格局的评价与制图，实现基于生态系统格局—过程—服务级联效应的流域生态屏障功能优化提供解决方案和对策，这也可以为全球干旱半干旱区的流域生态系统服务和生态安全可持续维持提供科学借鉴。

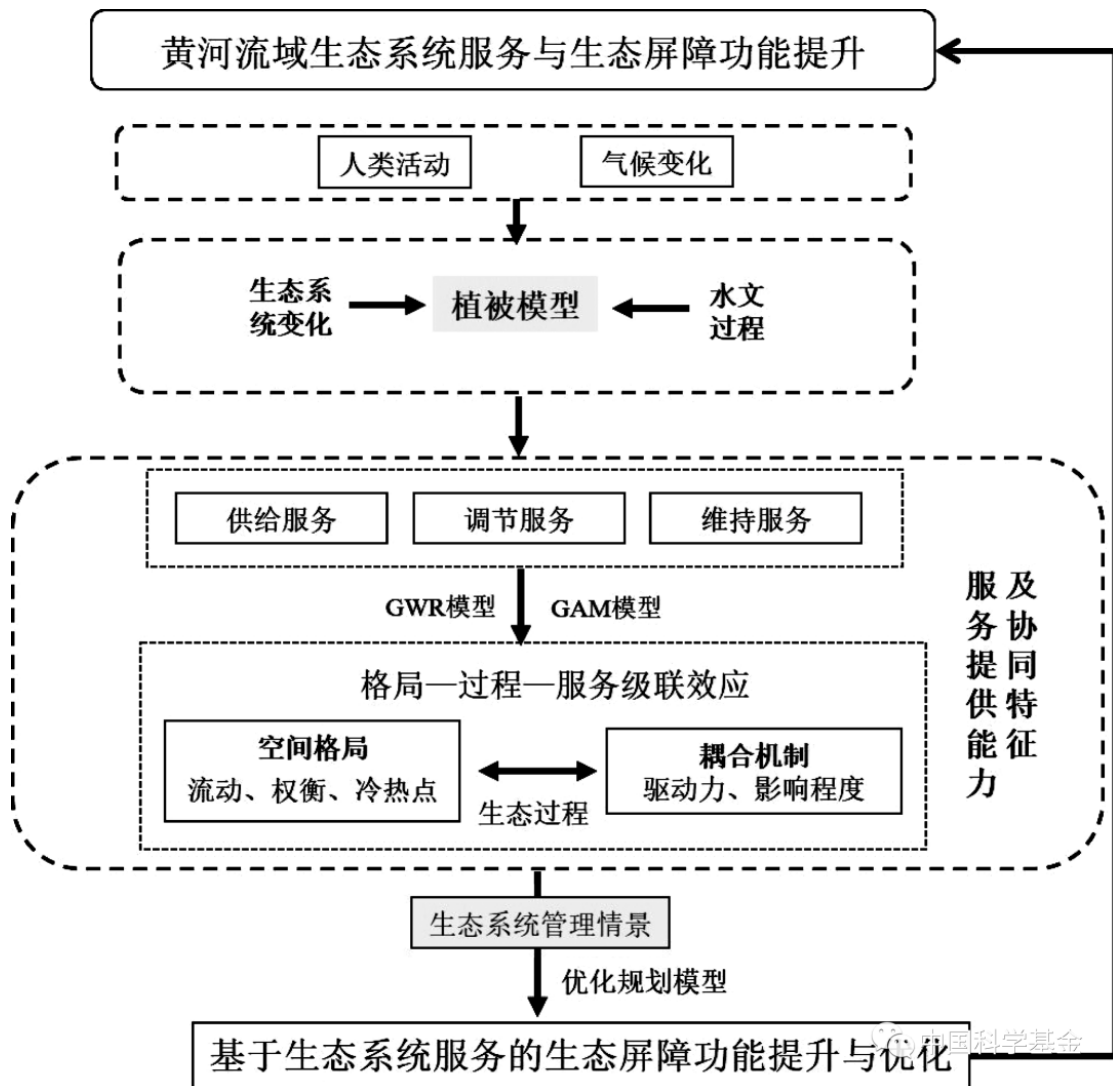


图 4 黄河流域生态系统格局—过程—服务的级联效应和生态屏障提升路线图

4 研究展望和建议

黄河流域生态系统具有高度的生态脆弱性和巨大的时空异质性，使其在世界级大河流域中极具典型性。从为黄河流域生态保护和高质量发展的国家战略提供科技支撑出发，提出以下建议：

(1) 黄河流域上中下游的自然条件、资源禀赋、发展程度差异显著，所面临的生态、经济和社会问题各有特点，功能定位和

发展路线迥然不同，但是对黄河流域生态系统的研究，需要服从流域生态系统完整性的“一盘棋”战略，注重系统性、整体性和协同性。

（2）充分认识气候变化和人类活动影响下生态系统结构、功能与生态水文过程之间的互馈关系是有效管理流域生态系统的关键。不论是从国际学科前沿还是从黄河流域自身研究现状看，在考虑流域生态系统完整性和连通性的基础上，亟需深化与加强生态系统变化及其驱动机制的研究，揭示黄河流域生态系统变化的生态水文调控机制，界定黄河源区水源涵养、黄土高原退耕还林还草和黄河口水沙调控的生态阈值。

（3）刻画变化环境下黄河流域生态水文过程机理，需要发展生态水文过程尺度转换方法，建立耦合生态、水文和社会经济的流域集成模型，提高生态过程、水文过程和社会经济发展动态的耦合度，提升对黄河流域生态系统变化及其对水资源和泥沙调控机制的认知水平，从而为黄河流域生态保护奠定基础。

（4）黄河流域生态保护和高质量发展是一项复杂而庞大的系统工程，其根基在于维护黄河的健康。只有系统剖析维持黄河健康所需的生态系统服务，才能优化和提升其生态屏障功能。黄河作为世界级大河，在生态系统变化与生态屏障功能方面的深入研究和集成创新，能够为推动地球系统科学和生态学在流域综合研究方面的深度融合与跨越发展提供科学范式，也可以从大河流域

层面推动联合国 2030 年可持续发展目标的实现,为世界大河流域可持续管理提供黄河范例。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 陈怡平, 傅伯杰. 关于黄河流域生态文明建设的思考. 中国科学报, 2019-12-20(6).
- [3] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 等. 黄土高原植被恢复成效及影响因素. 生态学报, 2020, 40(23): 8593—8605.
- [4] Wang H, Wu X, Bi NS, et al. Impacts of the dam—orientated water—sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River: A review. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 93—113.
- [5] Su W, Tao J, Wang J, et al. Current research status of large river systems: a cross—continental comparison. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 39413—39426.

- [6] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 35—44.
- [7] 陈怡平. 统筹构建黄河流域生态系统新格局. 中国科学报, 2020-8-18(7).
- [8] Lü Y, Zhang LW, Feng XM, et al. Recent ecological transitions in China: greening, browning, and influential factors. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8732.
- [9] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's loess plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6:1019—1022.
- [10] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14—22.
- [11] 马柱国, 符淙斌, 周天军, 等. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 52—60.
- [12] Zhao S, Wang DX, Feng CH, et al. Sequence of the main geochemical controls on the Cu and Zn fractions in the Yangtze River estuarine sediments. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, 10(1): 19—27.
- [13] Liu XQ, Gippel CJ, Wang HZ, et al. Assessment of the ecological health of heavily utilized, large lowland rivers: example of the lower Yellow River, China. *Limnology*, 2017, 18(1): 17—29.

- [14] Zhou R, Li YZ, Wu JJ, et al. Need to link river management with estuarine wetland conservation: a case study in the Yellow River Delta, China. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 146: 43—49.
- [15] Bi N, Wang H, Yang Z. Recent changes in the erosion-accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta lobe caused by human activities. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 70—78.
- [16] Sun G, Hallema D, Asbjornsen H. Ecohydrological processes and ecosystem services in the Anthropocene: a review. *Ecological Processes*, 2017, 6(1): 35.
- [17] Wang L, Manzoni S, Ravi S, et al. Dynamic interactions of ecohydrological and biogeochemical processes in water-limited systems. *Ecosphere*, 2015, 6(8): 1—27.
- [18] Falkenmark M, Rockstrom J. *Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology*. London: Earthscan Publications, 2004.
- [19] Hao YB, Wang YF, Huang XZ, et al. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146(1-2):57—69.
- [20] Feng XM, Sun G, Fu BJ, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2617—2628.

- [21] Wilcox BP, Le Maitre D, Jobbagy E, et al. Ecohydrology: Processes and implications for Rangelands// Briske DD. Rangeland Systems, Springer Series on Environmental Management. 2017, 85—129.
- [22] Belayneh M, Yirgu T, Tsegaye D. Effects of soil and water conservation practices on soil physicochemical properties in Gumara watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Ecological Processes*, 2019, 8(1): 36.
- [23] Hao YB, Cui XY, Wang YF, et al. Predominance of precipitation and temperature controls on ecosystem CO₂ exchange in zoige alpine wetlands of southwest China. *Wetlands*, 2011, 31(2): 413—422.
- [24] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 653—659.
- [25] 杜加强, 舒俭民, 熊珊珊. 黄河源区气候、植被变化与水源涵养功能评估研究. 北京: 科学出版社, 2015.
- [26] 吕文, 杨桂山, 万荣荣. “生态水文学”学科发展和研究方法概述. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(5): 29—33.
- [27] Zhang Y, Zhao Q, Cao Z, et al. Inhibiting effects of vegetation on the characteristics of runoff and sediment yield on riparian slope along the lower Yellow River. *Sustainability*, 2019, 11(13): 1—16.
- [28] D' Odorico P, Laio F, Porporato A, et al. Ecohydrology of terrestrial ecosystems. *BioScience*, 2010, 60(11): 898—907.

- [29] Bennett EM. Research frontiers in ecosystem service science. *Ecosystems*, 2017, 20(1): 31—37.
- [30] Grêt-Regamey A, Siren E, Brunner SH, et al. Review of decision support tools to operationalize the ecosystem services concept. *Ecosystem Services*, 2019, 26(PB): 306—315.
- [31] Islam M, Yamaguchi R, Sugiawan Y, et al. Valuing natural capital and ecosystem services: a literature review. *Sustainability Science*, 2019, 14(1): 159—174.
- [32] Agudelo CAR, Bustos SLH, Moreno CAP. Modeling interactions among multiple ecosystem services: a critical review. *Ecological Modelling*, 2020, 429: 109103.
- [33] Hou Y, Lü Y, Chen WP, et al. Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions: a case study on the central Loess Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1201—1217.
- [34] 樊杰. 中国主体功能区划方案. *地理学报*, 2015, 70(2): 186—201.
- [35] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3—12.
- [36] 白永飞, 赵玉金, 王扬, 等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 675—689.

- [37] Kukkala AS, Moilanen A. Core concepts of spatial prioritisation in systematic conservation planning. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2013, 88(2): 443—464.
- [38] Reside AE, Butt N, Adams VM. Adapting systematic conservation planning for climate change. *Biodiversity and Conservation*, 2018, 27(1): 1—29.
- [39] Chan KMA, Hoshizaki L, Klinkenberg B. Ecosystem services in conservation planning: Targeted benefits vs. co-benefits or costs?. *PLoS ONE*, 2011, 6(9): e24378.
- [40] Lü Y, Zhang LW, Zeng Y, et al. Representation of critical natural capital in China. *Conservation Biology*, 2017, 31(4): 894—902.
- [41] Xu WH, Xiao Y, Zhang JJ, et al. 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.