

doi: 10.12029/gc20210101

王尧, 陈睿山, 郭迟辉, 夏子龙. 2021. 近 40 年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议[J]. 中国地质, 48(1): 1-20.

Wang Yao, Chen Ruishan, Guo Chihui, Xia Zilong. 2021. Study on the pattern change and regional differentiation of resources and environment in the Yellow River Basin and suggestions on eco-geological survey[J]. Geology in China, 48(1):1-20(in Chinese with English abstract).

近 40 年黄河流域资源环境格局变化分析 与地质工作建议

王尧¹, 陈睿山², 郭迟辉³, 夏子龙²

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 华东师范大学, 上海 200241; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:20 世纪 80 年代以来, 自然演变与强烈的人类活动叠加, 致使黄河流域资源环境格局发生了显著变化, 进而影响其开发利用布局, 面临诸多资源短缺、环境退化和生态破坏问题, 急需从地球系统科学的视角深入研究流域资源环境的格局变化特点, 识别重大资源环境问题, 提出解决方案, 为黄河流域可持续发展提供决策依据。本研究以“山水林田湖草”生命共同体理念和地球系统科学理论为指导, 利用多源多时相调查研究数据, 分析黄河流域 1970—2015 年近 40 年气候、山区、水文等十一大类资源环境格局变化及区域分异规律, 识别重大地质资源环境问题, 提出地质工作建议。研究表明: 黄河流域气候整体暖干化趋势明显, 局部出现暖湿现象; 山区生态系统脆弱, 逐步恢复, 局部人类活动影响剧烈; 水体与湿地面积总体减少, 近年呈增加趋势, 径流量呈减少趋势, 部分干支流污染严重, 水生生物多样性减少; 农田面积呈下降趋势, 下游地区农田生产潜力增加明显; 植被覆盖呈现整体缓慢升高、局部退化趋势; 草地面积持续减少, 草地生态系统退化明显; 荒漠化扩展态势得到遏制, 总体形势依然严峻; 自然灾害频发, 水害严重, 地质灾害聚集分布, 形成陇中黄土高原和陇南山地两个高发区; 城镇建设用地面积持续上升, 由下游地区向中上游扩散, 中上游呈现出由轴线连接的多个核心的组团分布特征; 人口分布重心进一步向东偏离, 沿中心城市、干流、交通干线增加; GDP 整体呈现上涨趋势, 呈现由东向西递减、由干流或主流沿岸向两边递减、由中心城市向周围递减。为保护黄河流域生态环境、促进高质量发展, 解决黄河流域面临的复杂多样的地质资源环境问题, 建议地质工作以地球系统科学理论为指导对黄河流域重大地质资源环境问题进行系统调查研究; 以地球系统科学研究方法为框架, 进行跨学科协作, 整合区域性地质调查工作。

关键词:黄河流域; 资源环境格局变化; 生态环境保护; 国土空间; 地质调查工程

中图分类号: P66; P964 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)01-0001-20

Changes of resource and environmental pattern of the Yellow River Basin in the past 40 years and suggestions on geological work

WANG Yao¹, CHEN Ruishan², GUO Chihui³, XIA Zilong²

(1. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

收稿日期: 2020-08-19; 改回日期: 2020-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41641011)、中国地质调查局项目(DD20190427, DD20190463)及陕西省地质调查项目(201917)联合资助。

作者简介: 王尧, 女, 1979 年生, 博士, 副研究员, 主要从事自然地理和地质调查战略研究; E-mail: wangyaopku@pku.edu.cn。

Abstract: Since the 1980s, natural evolution and intense human activities have superimposed a significant change in the pattern of resources and environment in the Yellow River Basin, which further affects its development and utilization distribution and leads to a lot of problems such as resource shortage, environmental degradation and ecological destruction. From the perspective of earth system science, it is urgent to study the changes of the resources and environment pattern in the Yellow River Basin, identify major resources and environment problems, and put forward solutions, so as to provide decision-making basis for the sustainable development of the Yellow River Basin. With " life community of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses " concept and earth system science theory as the instruction, according to the investigation of multisource and multiphase data, this paper analyzes the changes in eleven major resources environmental patterns and regional differentiation in the Yellow River Basin in the last 40 years from 1970 to 2015, including climate, mountainous area and hydrology, identifies the major geological resources and environment problems, and advances some suggestions on the geological work. The results show that the climate of the Yellow River Basin as a whole has an obvious trend of warming and drying, and the phenomenon of warming and humidity appears locally. In recent years, the total area of water and wetland has been decreasing, and the runoff has been decreasing. Some of the main tributaries are seriously polluted, and the aquatic biodiversity has been reduced. In addition, the mountain ecosystem is fragile and gradually restored, the impact of local human activities is intense, the farmland area shows a downward trend, and the farmland production potential in the downstream area is increasing obviously. Moreover, vegetation cover shows a slow increase trend and local degradation, grassland area continues to decrease, grassland ecosystem degradation is obvious, the trend of desertification expansion has been contained, and the overall situation is still grim. In this case, frequent natural disasters, serious water disasters and concentrated geological disasters have led to the formation of such two high incidence areas in southern Gansu as Loess Plateau and Mountains. The continuous rise of urban construction land area leads to the spread of land area from the downstream area to the middle and upper reaches, which shows the cluster distribution characteristics of multiple construction land cores connected by axes. As a result, the center of population distribution further deviates to the east and increases along the central city, trunk stream and traffic lines. The overall GDP shows an upward trend, but manifests a decline from east to west, from the main stream or tributary coast to both sides and from the central city to the surrounding. In order to protect the ecological environment of the Yellow River Basin, promote the high-quality development and solve the diverse geological resources and environmental problems, it is suggested that geological work should be guided by the theory of earth system science to carry out systematic investigation and research on the major geological resources and environmental problems of the Yellow River Basin. Based on the research method of earth system science, we should carry out interdisciplinary cooperation and integrate regional geological survey.

Key words: Yellow River Basin; change of resource and environment pattern; ecological environment protection; national space; geological survey engineering

About the first author: WANG Yao, Female, born in 1979, research associate, doctor, engaged in natural geography, geological survey strategy research; E-mail: wangyaopku@pku.edu.cn.

Fund support: Supported by Project of National Natural Science Foundation of China (No.41641011), the project of China Geological Survey (No.DD20190427, No.DD20190463), Geological survey Project of Shaanxi Province(No.201917).

1 引 言

过去几十年,人类活动和气候变化的共同影响导致了全球土地荒漠化、生物多样性减少、森林植被破坏、水资源危机、环境污染等一系列新问题(吴绍洪等,2009; IPCC,2014)。黄河流域自西向东横跨3个地形阶梯,自北向南跨越3个气候带,气候类型多样,水陆生态系统类型多样,是中国重要的生态屏障和重要的经济地带,2019年习近平总书记提出了实现黄

河流域生态保护与高质量发展的指示。工业化和城镇化过程改变了流域人口、城市、自然资源供需的分布,进而改变了陆地表层格局,而陆地表层格局变化又反过来影响流域的资源环境开发利用布局,导致人口、资源空间分布不均。如何理清区域开发与保护关系,在发展与保护之间找到平衡点是黄河流域当前发展中的一个关键命题。资源环境已经从发展条件演变为制约流域生态安全的一个关键因素,对流域资源环境格局变化和重大问题认识上的不确定性是未来

社会发展的潜在威胁,对此,需要从地球系统科学的视角开展深入的研究。

陆地表层格局变化是地球系统科学研究的重点之一,地表系统的水、土(岩)、气、生、人各要素的物理过程、化学过程、生物过程、社会过程及其综合体的时空耦合规律,也越来越成为地球系统科学研究中最受关注的基础问题。全球变化研究的四大科学计划(WCRP、IGBP、IHDP、DIVERSITAS)、人与生物圈(MAB)、地球系统科学联盟(ESSP)科学计划等均以陆地表层为主要研究对象(吴绍洪等,2015),强调在地表环境演变和人类活动影响下陆地表层环境变化及其引起的资源、生态、污染等问题的研究。

近几十年学者围绕黄河源区、不同流域段以及整个流域的土地利用、气候要素、景观格局、湿地、植被NPP、水文等的时空格局、变化特点、驱动机制、效应和应对措施等开展了深入研究(申怀飞,2007;史建国等,2008;温庆可等,2011;黄琦,2012;李帅,2015;田智慧等,2019;陈琼等,2020;王尧等,2020)。当前,资源环境已经从发展条件演变为制约流域生态安全的一个关键因素,对流域资源环境格局变化和重大问题认识上的不确定性是未来社会发展的潜在威胁,前人研究尚缺乏对整个黄河流域的陆地地表系统的水、土(岩)、气、生、人各要素的格局变化进行整体研究,并揭示地质作用和过程在流域地表格局变化中的重要影响。

本研究利用土地利用遥感解译数据、地质地貌、气象、社会经济等多源多时相数据,分析黄河流域1980年以来气候、山区、水文、植被、农田、草地、城镇建设用地、荒漠化、自然灾害、人口、经济等十一大类资源环境系统时空格局变化,并预测其发展趋势,识别重大资源环境问题,提出地质工作建议,以为黄河流域国土空间规划、自然资源调查管理和战略性综合地质调查工作提供决策参考。

2 流域概况

黄河干流河道全长5464 km,流经9省71个市(包括州、盟,下同),以流经市域作为流域范围,黄河流域总面积198.46万km²。黄河上游从源头到内蒙古自治区的河口镇(图1),流经青海、四川、甘肃、内蒙古和宁夏5省18市,面积143.37万km²;中游从

河口镇至河南郑州桃花峪,流经甘肃、河南、山西和陕西4省25市,面积39.48万km²;下游从桃花峪到渤海,流经河南和山东2省18市,面积15.60万km²。黄河发源于青藏高原,流经黄土高原水土流失区、五大沙漠沙地,地质环境总体脆弱;中度至极度脆弱区面积约占黄河流域土地面积的37%;呈现上游较高、中游次之、下游较低的总体空间格局(图2),并且不同程度脆弱性呈镶嵌分布(B.T. Трофимов等,1995;沈芳等,1999;张丽君等,2005;王尧等,2019)。

3 数据来源与方法

数据来源包括中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供的:1980—2015年每5年一期1:10万中国陆地生态系统类型空间分布数据、中国土壤侵蚀空间分布数据、1995—2015年每5年一期中国GDP空间分布公里网格数据集、1990—2015年每5年一期中国人口空间分布公里网格数据集、中国100万地貌类型空间分布数据、2000—2015年每5年一期中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集、1970—2010年每10年一期中国农田生产潜力数据集、2000—2010年每5年一期全球夜间灯光数据,以及2015年中国地市、省级行政边界数据。中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的:中国气象背景数据集500 m分辨率、中国1980年以来逐年降水量空间插值数据集、中国1980年以来逐年平均气温空间插值数据集。中国地质环境监测院提供的2015—2018年中国地质灾害点空间分布数据等。

借助ArcGIS空间分析功能,按黄河流经地市边界范围重新提取生成黄河流域边界数据,从上述各种数据中提取生成相应的黄河流域数据。运用Google Earth Engine平台提供的统计分析函数工具,采用线性回归(徐宗学等,2006;杜家菊等,2010)、滑动平均(裴益轩等,2001;田红等,2005)和Sen's斜率估计(任婧宇等,2019)等趋势分析方法,评估黄河流域山水林田湖草等十一大类资源环境系统格局的变化速率,最终得到1 km×1 km分辨率各系统每5年变化速率的空间分布图。

4 格局变化

利用黄河流域相关资源环境数据,分析黄河流

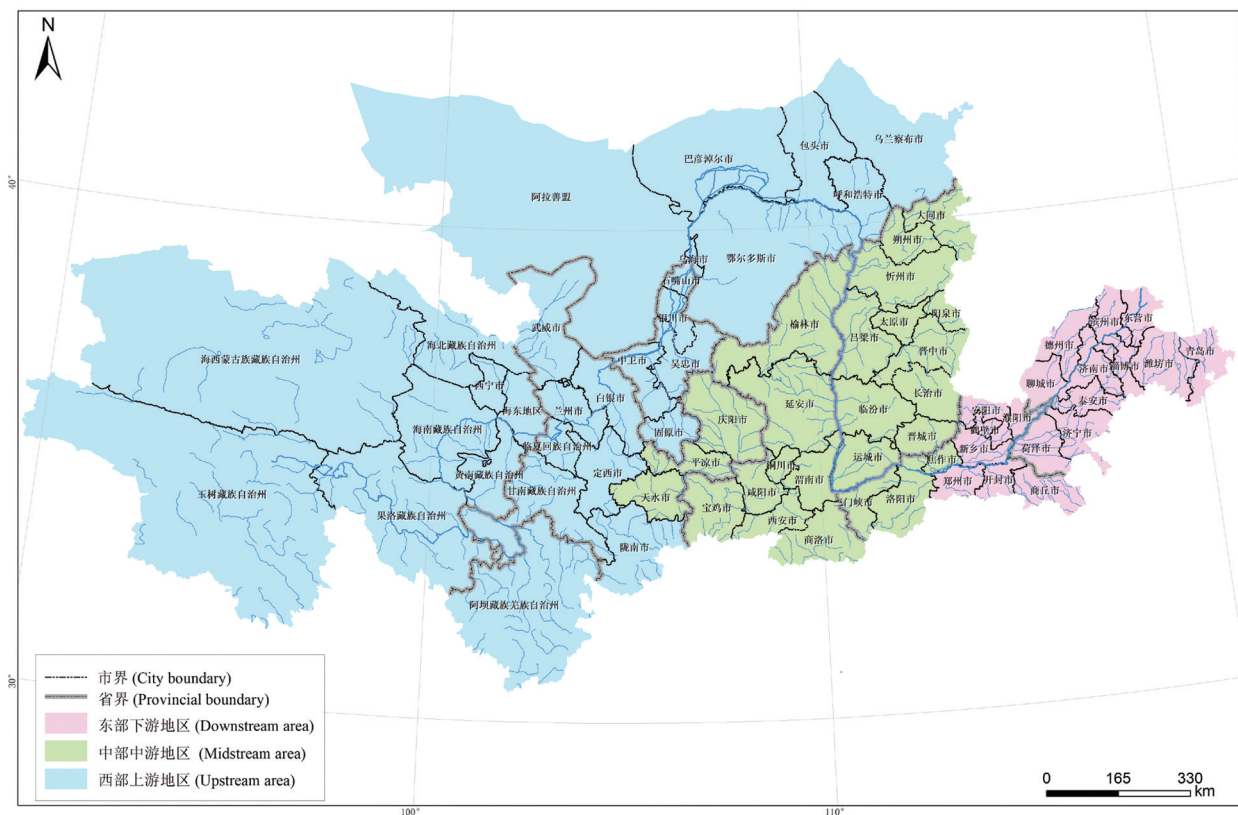


图1 黄河流域范围图

Fig.1 Map of the Yellow River Basin

域1980年以来气候、山区、水文、植被、农田、草地、城镇建设用地、荒漠化、自然灾害、人口、经济等十一大类资源环境系统时空格局变化,并预测其发展趋势。

4.1 气候格局变化

整体暖干化趋势明显,局部出现暖湿现象。

黄河流域地处中纬度地带,受大气环流和季风环流影响的情况比较复杂,流域内不同地区气候差异显著。近40年黄河流域大部分地区气温升高明显(图2),但降水减少,气候变化表现为暖干化趋势(张强等,2010;杨金虎等,2012;陈志昆等,2013;廉陆鹞等,2019;王冠等,2020),进一步加剧该地区农业水资源的供需矛盾(刘德祥等,2005)。西北部海西、海北及阿拉善盟等部分地区伴随着气温的升高,降水量也增加,呈现暖湿变化特征,从长远来看,需制定适应性对策,以减少气候变化的不利影响。气温变化具有明显波动性。年均气温偏高、偏低的变化与时间尺度大小有密切关系,主要有5~6 a、10~11 a和21~22 a三个时间尺度;对未来年均气

温趋势的预测应该建立在不同时间尺度上。

降水总体呈减小趋势,丰枯交替变化明显(图3)。黄河流域降水量偏少,全流域多年平均年降水量为438 mm,总的格局是由东南向西北递减,降水量最大处位于流域南部久治、红原以及卢氏、栾川一带,均达到750 mm,向北递减至玛多、临夏、榆林以及呼和浩特一线的400 mm,再递减至中卫、银川以及乌拉特后旗一线的200 mm。年均降水量具有丰枯交替变化的波动特性。年均降水量偏高、偏低的变化与时间尺度大小有密切关系,主要有9~10 a、15~16年和22~23 a三个时间尺度;对未来年均降水量趋势的预测应该建立在不同时间尺度上。

4.2 山区格局变化

生态系统脆弱,整体在恢复,局部人类活动影响剧烈。

山地覆盖了60%以上的黄河流域面积(图4a),对黄河流域的生态和社会经济可持续性具有关键作用。然而,山区贫困发生率高,极易受到气候变化、毁林、土地退化和自然灾害的影响。

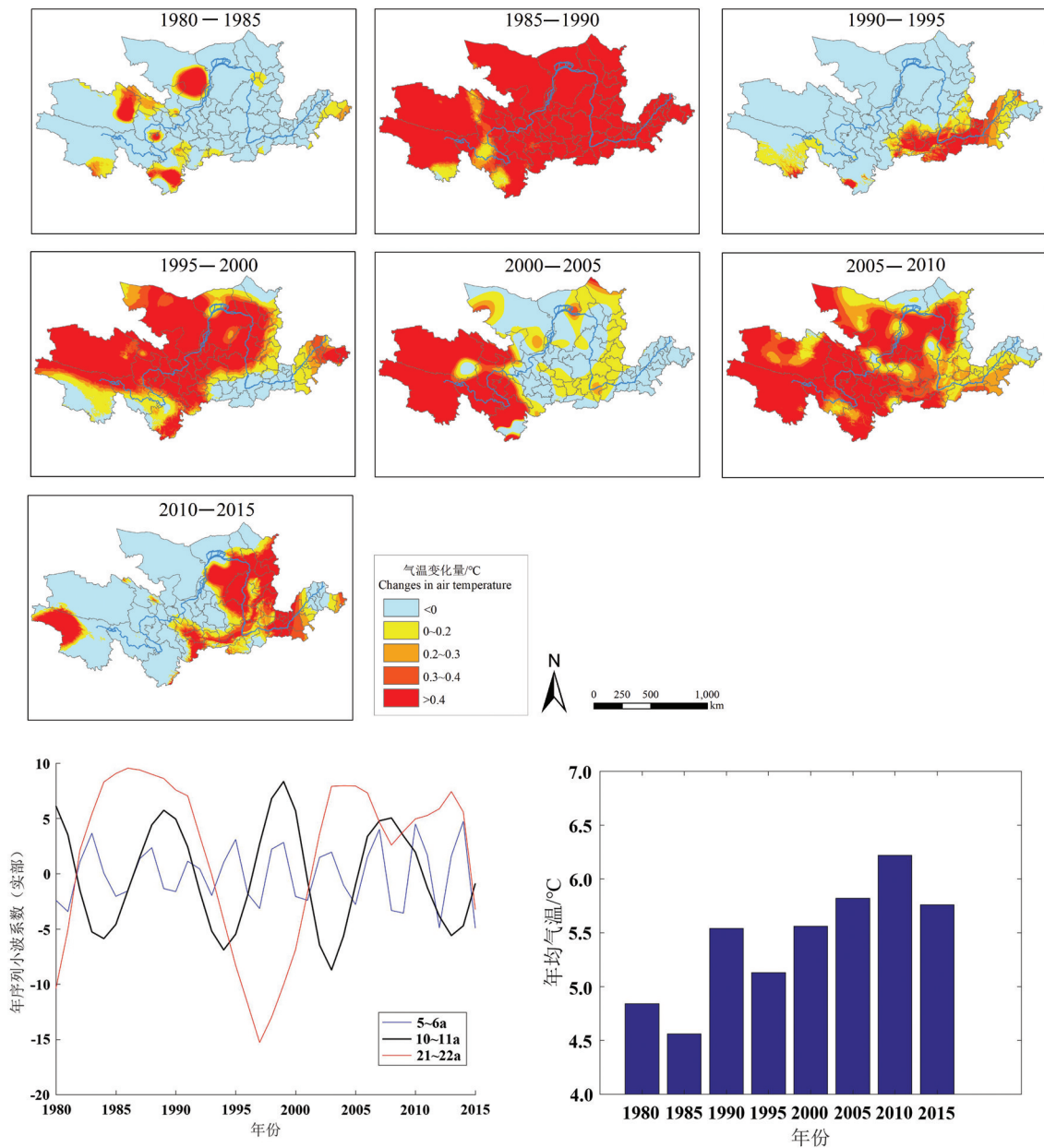


图2 黄河流域气温变化趋势格局图与小波系数图
Fig.2 Temperature change trend of the Yellow River Basin

“三江源”地区是影响西部发展的特殊地区,其自然环境严酷,生态系统非常脆弱、敏感,一旦破坏,很难恢复(董锁成等,2002;赵新全等,2005)。其对保护“中华水塔”,保持青藏高原冻融区原貌,保护高原湿地和特有的生物物种,控制大面积的草地退化、水土流失、土地荒漠化和沙尘暴等环境灾害,减缓高原生态环境恶化的势头,保护地球“第三极”等自然景观,都具有深远而重大的战略意义。

祁连山是中国生物多样性保护优先区域,也是

黑河、石羊河和疏勒河等6大内陆河和黄河支流大通河的重要水源地(王方,2012;汪有奎等,2013)。1961—2017年,祁连山区气候暖湿趋势显著,生长季逐渐延长,祁连山北坡出山径流整体呈增加趋势;近年来,因矿产、草场和水资源的无序开发利用,祁连山局部生态遭受到严重人为破坏,目前正在进行生态治理修复,植树造林区植被覆盖度明显提高;禁牧后的草地土壤有机质、覆盖度也逐步增加。

秦岭山地横贯中国中部地区,是中国南北重要

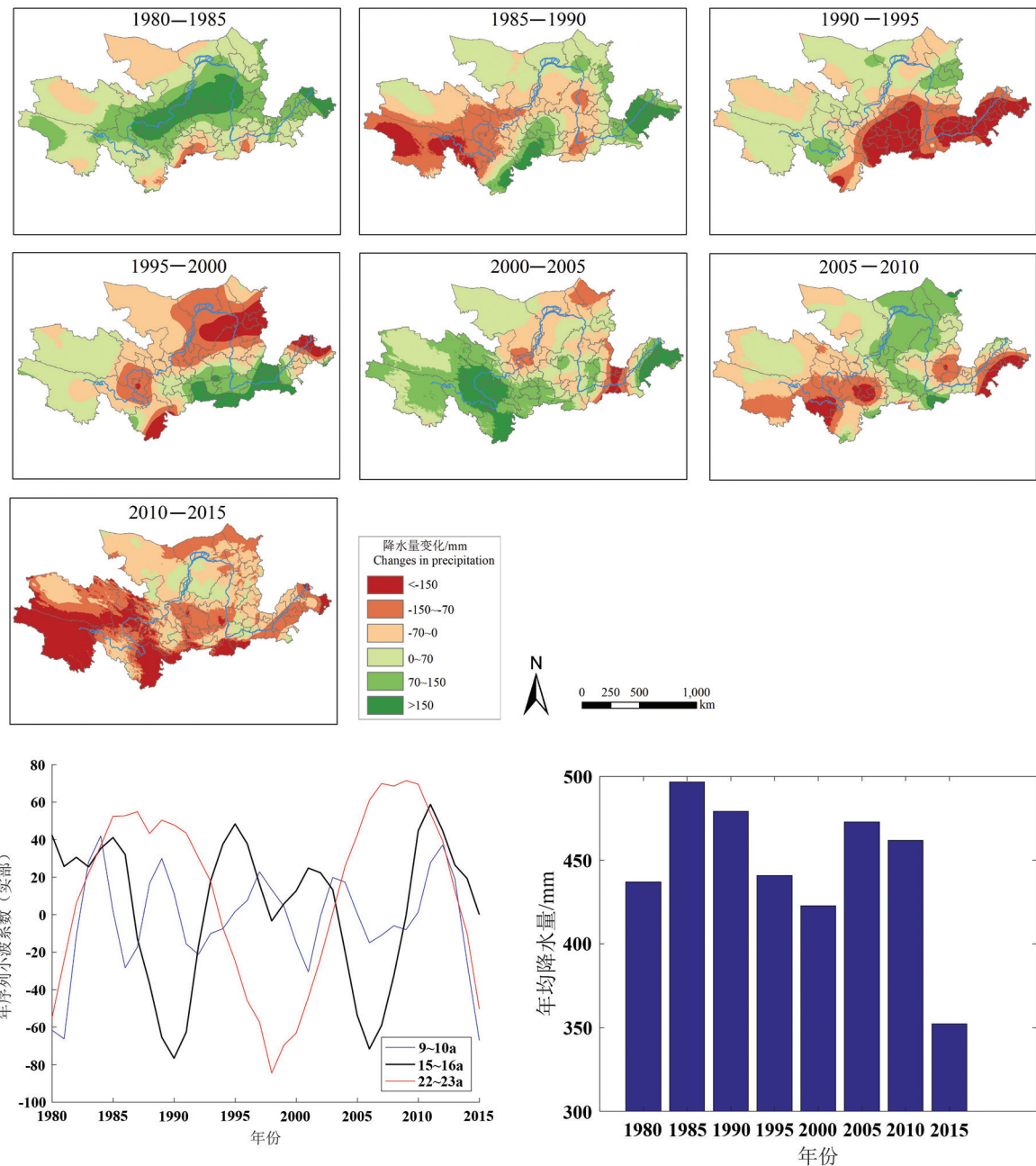


图3 黄河流域降雨量变化趋势图
 Fig.3 Rainfall change trend of the Yellow River Basin

的天然分界线,是东亚地区生物多样性最丰富的热点地区之一,也是中部生态安全的天然屏障(潘景璐,2013;房志等,2017)。秦岭的生态环境好坏直接影响黄河中下游地区的经济社会发展以及南水北调中线工程水源供给。进入21世纪以来,由于生态保护意识缺位、生态保护责任淡漠、利益驱动等多种原因,秦岭南北麓出现了不同程度的无序开发和违章建设别墅等有悖生态文明建设的乱象,引发

了一系列生态和社会问题。

4.3 水文格局变化

水体与湿地面积总体减少,近年呈增加趋势;径流量呈减少趋势;部分干支流污染严重,水生生物多样性减少。

黄河流域水体与湿地面积呈先减后增的趋势。黄河两岸湖泊、湿地众多(图4b)。在1980—2000年间水体与湿地面积显著减少的地区主要分

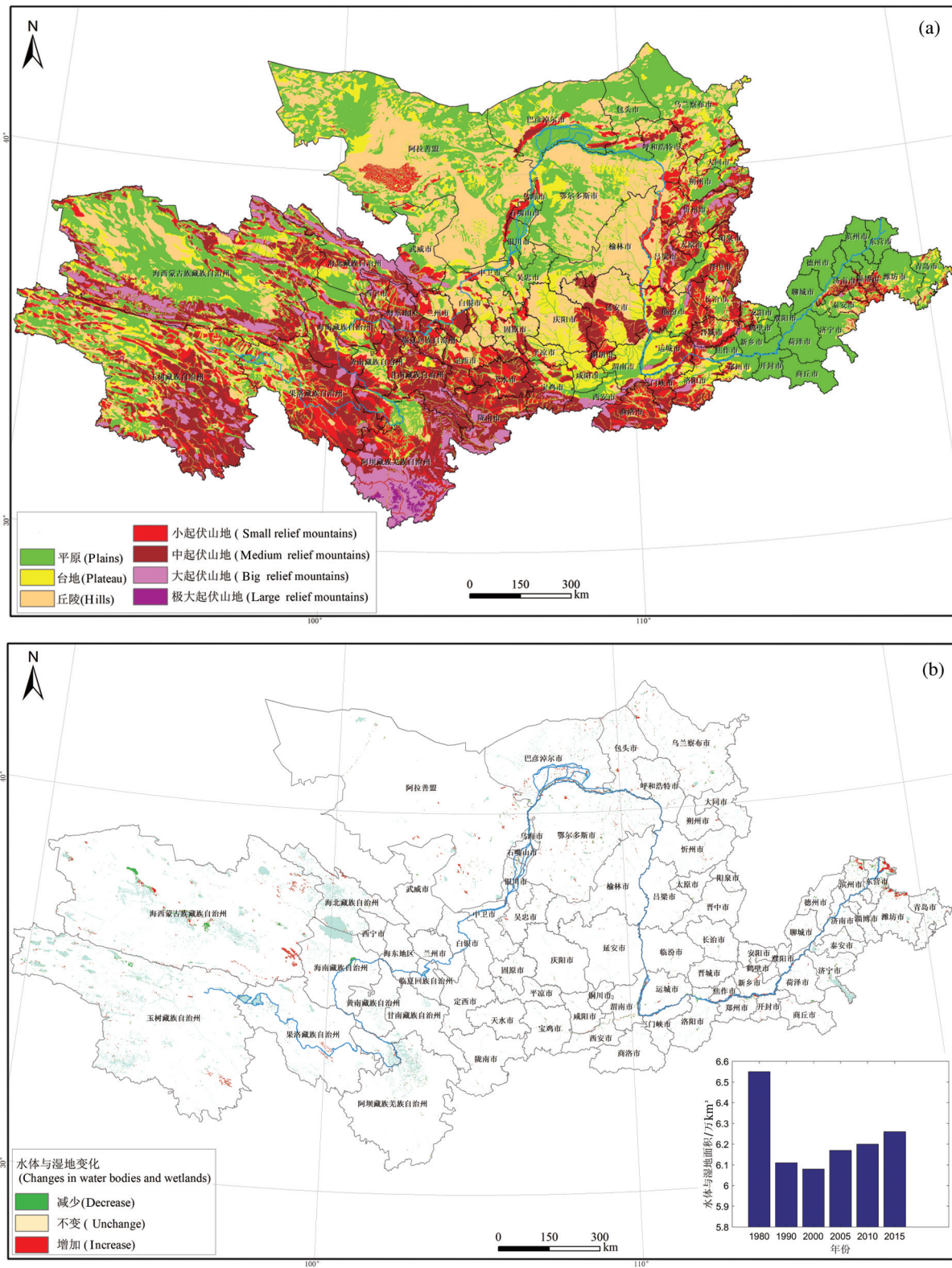


图4 黄河流域山地分布图(a)及水体与湿地变化格局图(b)

Fig.4 Distribution map (a) of mountains and pattern changes of water body and wetland (b) of the Yellow River Basin

布在黄河上游,例如海西蒙古族藏族自治州、阿坝藏族羌族自治州、海北藏族自治州。在2000—2015年间,黄河流域水体与湿地面积呈增加趋势,特别是通过生态补水等工程,乌梁素海、黄河河口湿地生态恢复成效显著(韩大勇等,2012;卓俊玲等,2013;张仰正等,2014;郭嘉等,2015;彭勃等,2015;张珮纶等,2017;杨薇等,2018)。但整个流域水体与湿地仍未恢复至1980年的水平,2015年相比1980年减少了2900 km²。

部分干支流污染严重,水生生物多样性减少(李玉洪等,2001;蒋廉洁,2006;吕振豫等,2017)。黄河含沙量大、水沙关系不协调,是黄河复杂难治的症结之一。黄河流域以占全国2%的水资源承纳了全国约6%的废污水排放量和7%的化学需氧量,部分干支流污染严重。涉水工程建设对水生生物资源及其生境造成影响,受威胁鱼类种数占总数的14.7%。

整个流域近40年的实测径流量和天然径流量均呈减少趋势。流域径流量的减少除与大尺度的气候变暖有关外,区域尺度的植被覆盖变化和人类用水量(如农业灌溉)的增加也是不可忽视的原因。

4.4 农田格局变化

农田面积呈下降趋势;下游农田生产潜力增加明显。

黄河流域农田主要分布在中下游地区,整体呈减少趋势。农田面积在1980年为36.48万km²,到2015年减少到35.87万km²,减少了1.7%(图5)。农田减少主要发生在河南和山东地区,农田增加主要发生在东营市、中卫市、石嘴山市、银川市及吴中市。宁夏回族自治区的河套地区农田面积增加显著,是西北最主要的农业区。在1980—2000年间,农田增减地区交错分布,主要分布在黄河中游地区,这一时间段内,农田总面积呈波动上升。在2000—2015年间,农田总面积呈递减趋势,空间变化不是特别明显。

1970—2010年间黄河流域农田生产潜力增减趋势较为明显。整体变化趋势上,农田生产潜力增长趋势较大地区分布比较集聚,主要在河南东部和山东西部,其他地区增长趋势相对较小。黄河中游地区呈减少趋势,三门峡、洛阳市减少最为显著。1970—1980年间,黄河流域农田生产潜力变化由东

至西递减,下游基本呈增加状态,德州、新乡市增加幅度相对较大。上游基本呈减少状态,中卫市、兰州市、临夏回族自治区、白银市、吴忠市减小幅度相对较大。1970—1990年间,黄河流域农田生产潜力整体上呈增加状态,增加重心主要在中卫、白银市和聊城、濮阳一带,少部分地区减少,主要在渭南、运城、济南等地区。1990—2000年间,黄河流域农田生产潜力变化发生了很大的改变,整体呈现减少的状态,特别是上游地区的平凉、固原市和下游的山东、河南北部地区。进入2000年后,中游地区的农田生产潜力逐渐开始恢复,减少地区主要在下游河南南部地区。

4.5 植被格局变化

植被覆盖呈现整体缓慢升高、局部退化趋势。

黄河流域大部分地区植被覆盖状况在不断改善,归一化植被指数(NDVI)的年际变化趋势呈现较为缓慢的增长,增速为0.021/5a。森林覆盖率由1980年的10.42%增加到2015年的10.56%,呈逐年上升趋势。约47.3%的地区植被覆盖得到了改善,黄土高原、腾格里沙漠以及毛乌素沙地地区增加趋势尤为突出(图6a);明显改善区主要集中在甘肃南部的定西、天水、平凉和陕西北部的榆林、延安,增加速率超过了0.08/5a;中游大部分地区NDVI增加速率保持在每五年增加0.02~0.08;青海省南部、内蒙古东部地区增加相对较慢。约48.2%的区域植被覆盖基本没有发生变化。

但仍有部分地区的植被呈退化趋势,约4.5%的区域植被覆盖在减少,轻微退化区域主要分布在黄河流域的西部,阿拉善盟、海西蒙古族藏族自治州等地区减少相对缓慢;明显退化区只占流域总面积的0.29%,集中分布在黄河下游,其中西安、太原、兰州、郑州等省会城市NDVI减少趋势较为明显,下降趋势超过了0.08/5a。

黄河流域森林覆盖率由1980年的10.42%增加到2015年的10.56%,呈逐年上升趋势。在2000年前后森林面积骤增,政府贯彻“以营林为主,采育结合”的方针,实施以“天然林保护”为主的水源涵养林植被恢复工程;倡导以保护为主,合理利用,是2000年后森林面积陡然增加的原因所在。

4.6 草地格局变化

草地面积持续减少,草地生态系统退化明显。

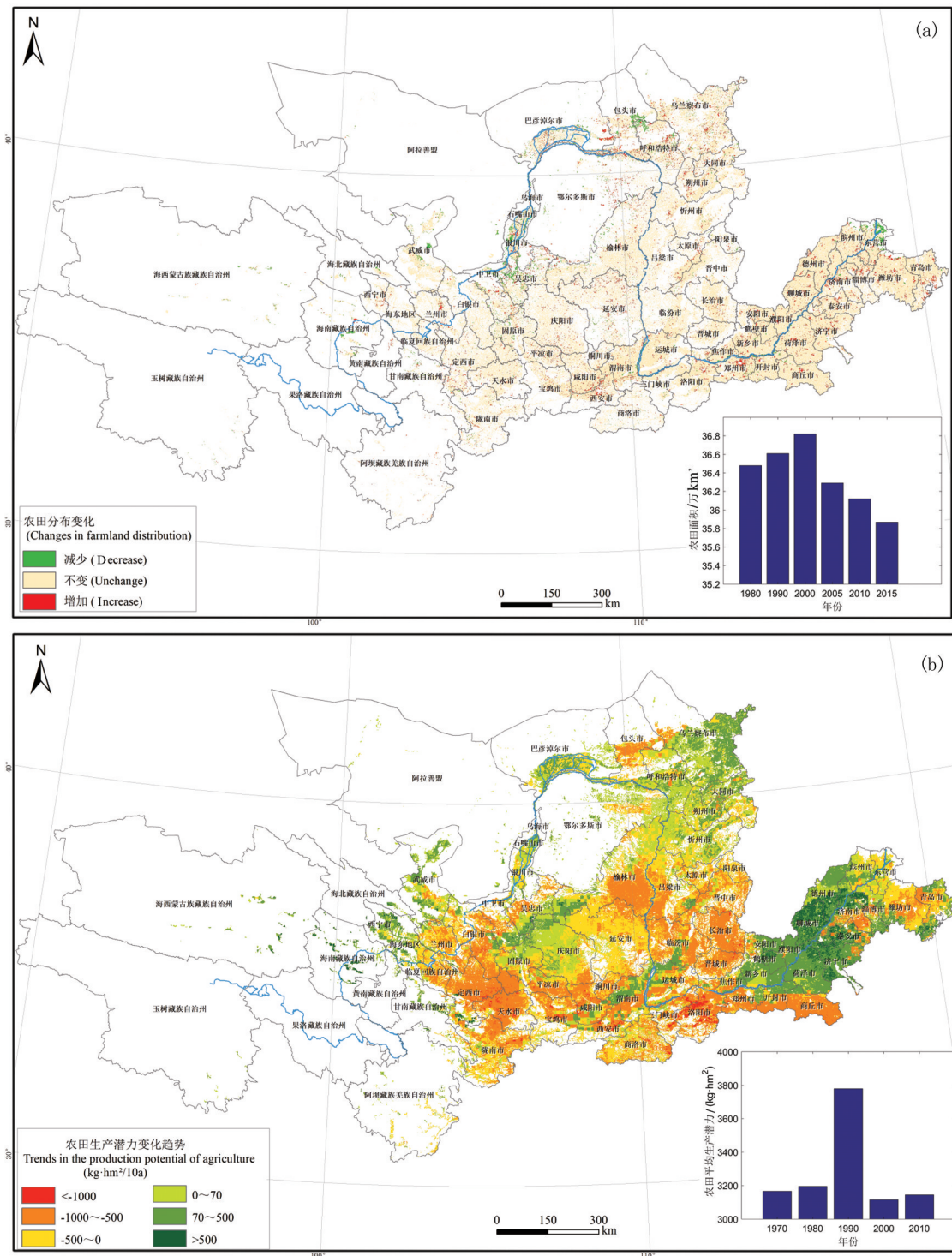


图5 农田变化趋势图(a)和农田生产潜力变化趋势格局图(b)
Fig.5 Change trend of farmland (a) and farmland production potential (b)

黄河流域地处中国干旱半干旱和半湿润地区,草地是主要的土地利用类型,约占总流域总面积的40%。黄河流域草地面积在1980—2015年间逐年下降(图6b)。1980年流域草地面积为80.26万km²,

到2000年急剧减少了4900 km²。到2015年,35年间草地净面积下降0.93%,减少了7500 km²,导致生物多样性指数逐步下降,草地生态系统退化明显。

黄河流域城镇化的快速发展以及农业过度开

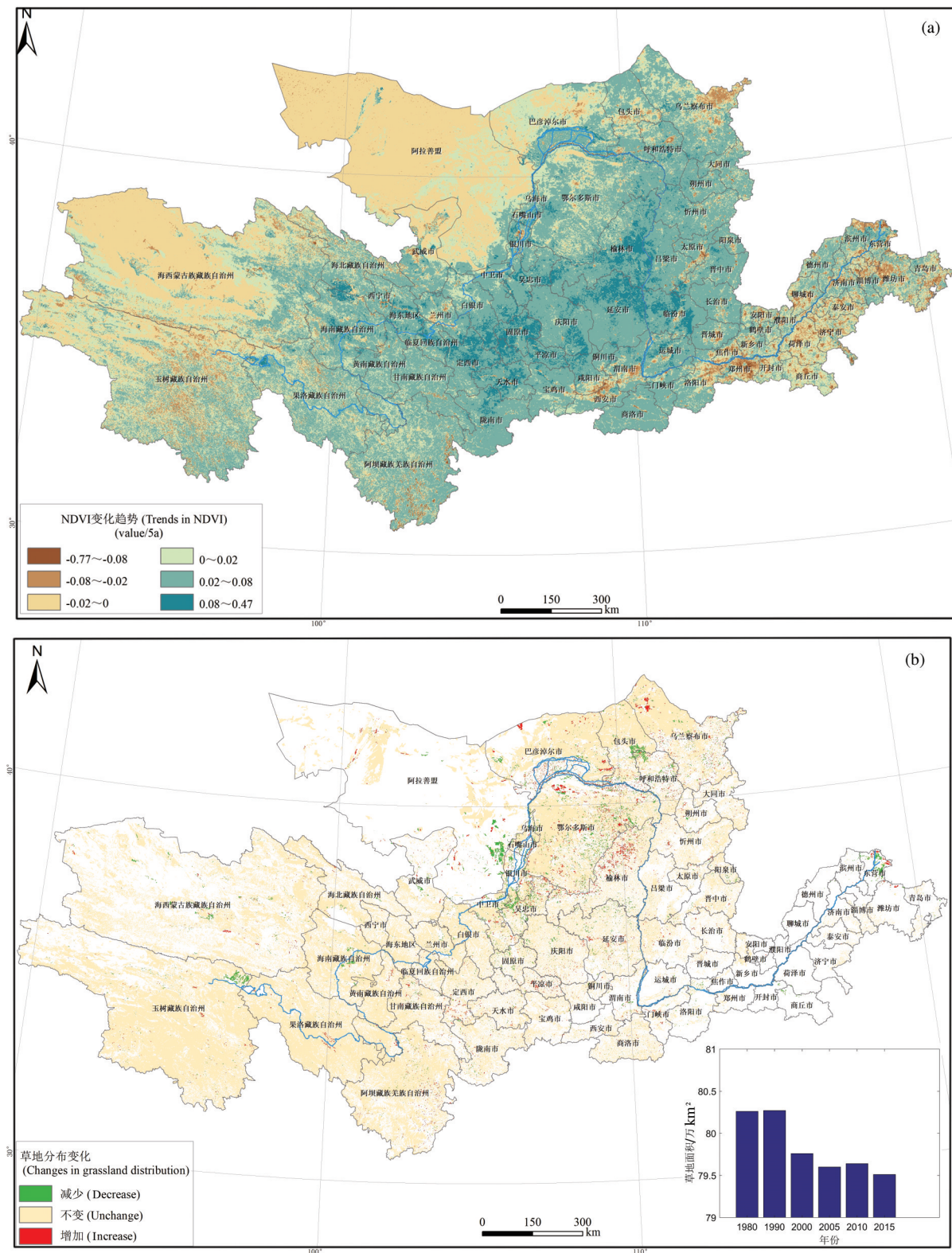


图6 归一化植被指数DNVI(a)及草地变化趋势格局图(b)
Fig.6 Pattern of normalized vegetation index (NDVI) (a) and grassland(b)

发是导致流域草地面积不断缩减的重要原因(张德铨等, 2006; 杜际增等, 2015; 陈琼等, 2020), 尤其是泾河、渭河、汾河等地区, 地势较为平坦, 土壤较为肥沃, 草地向农地转移最为显著。此外, 上游地区非保护区域内过度放牧、中上游拦坝蓄水、中游地区工农业用水激增, 导致河流下泄量日趋减少, 使下游河床、湖泊干涸, 地下水位下降, 草原衰退。

草地面积增加主要在原林地、未开发用地上, 集中于西北的宁夏、内蒙古河套等地。在这些地区国家相继实施了退耕还林还草工程、退牧还草工程以及草原生态保护补助奖励政策, 期间牲畜存栏量下降了近一半, 这极大地减轻了草地的负担, 同时国家在启动了水量统一调度方案, 使得下游地区的水资源短缺问题得到了一定程度的缓解, 因此, 草原面积有一定程度的回升。

4.7 荒漠化格局变化

荒漠化扩展态势得到遏制, 总体形势依然严峻。

黄河流域荒漠化问题十分突出。由于受青藏高原隆升、全球气候变化以及亚洲季风系统的影响, 西北地区的干旱化趋势是黄河流域较长历史时期内荒漠化发生、发展的决定性因素。而黄河中游地区大多数荒漠化是由人类活动引发的, 并在自然外营力的作用下加剧(陈英玉等, 2008; 李红超等, 2013; 李任时等, 2014)。黄河流域荒漠面积呈先增后减的趋势, 在1980—2005年黄河流域荒漠化形势十分严峻, 荒漠面积逐年增加(图7a), 累计增加了18.93万 hm^2 , 从2005年开始荒漠化扩展得到遏制, 到2015年, 荒漠化土地15年间减少了42万 hm^2 。流域中游黄土高原蓄水保土能力显著增强, 实现了“人进沙退”的治沙奇迹, 库布齐沙漠植被覆盖率达到53%。通过流域生态环境保护修复行动, 黄河流域内荒漠化土地2018年比2009年减少35.18万 hm^2 , 沙化土地比2009年减少28.64万 hm^2 ; 其中库布齐沙漠治理模式被联合国确定为“全球沙漠生态经济示范区”。

但流域荒漠化形势依然严峻。荒漠土地超过流域总面积的20%, 荒漠化加重区集中分布在玉树藏族自治州的西北角、腾格里沙漠地区, 在鄂尔多斯市呈大面积零散分布。风成地貌类型上的荒漠化最严重(图7), 占43.1%, 治理难度最大。

4.8 自然灾害格局变化

灾害频发, 水害严重; 地质灾害聚集分布, 形成

陇中黄土高原和陇南山地两个高发区。

长期以来, 黄河流域由于自然灾害频发, 特别是水害严重, “黄河宁, 天下平。”历史上, 黄河三年两决口、百年一改道。据统计, 从先秦到解放前的2500多年间, 黄河下游共决溢1500多次, 改道26次, 北达天津, 南抵江淮(习近平, 2019)。黄河下游除艾山附近为山区丘陵外, 其余全靠堤防约束洪水泥沙, 由于泥沙淤积, 使该河段成为世界上著名的地上悬河。中国最大的平原——黄淮海平原, 是我国经济社会的核心地区之一, 历史上堤防频繁决口改道, 黄河洪水泥沙对黄淮海平原带来巨大的灾难, 为中华民族的心腹之患。黄土高原水土流失极为严重, 使黄河多年平均输沙量达16亿t, 是我国乃至世界上水土流失面积最广、强度最大的地区(曹文洪, 2003)。

2018年黄河流域共发生648起地质灾害, 崩塌、滑坡和泥石流灾害是流域主要突发性地质灾害, 空间上呈集聚分布, 形成两个高发区(图7b), 一个是兰州市和青海省交界处, 另一个是甘肃南部和与陕西交界处, 两者都处在黄土高原向青藏高原过渡带, 这与该区域的地形地貌、岩土构造、水文地质条件等密切相关。中下游地区地质灾害相对分散, 零星分布于山西、陕西两省, 以滑坡、崩塌为主, 主要受该地区黄土地貌, 气候降水等因素影响。

4.9 城镇建设用地格局变化

面积持续上升, 由下游地区向中上游扩散; 中上游呈现出由轴线连接的多个核心的组团分布特征。

黄河流域城镇用地面积呈递增趋势(图8a), 2015年较1980年增加了1.53万 km^2 , 近43%。空间变化上, 黄河流域城镇用地增加重心在下游河南和山东两省, 其余地区主要集中在各省省会城市。城镇用地变化在省域和区域内差异明显, 东部地区明显大于西部地区。东部山东、河南城市群城镇用地整体扩张蔓延度高, “蔓延式”扩张局势较为严重, 统筹协调程度较低, 区域扩张差异明显。时间变化上, 1980—1990年间, 山东省城镇用地面积增幅最大, 其次是河南省。在1990—2010年里, 城镇用地增加速度整体放缓, 部分地区城镇用地减少。2000—2005年间, 鄂尔多斯、海西城镇用地增加面积较大。2010—2015年间, 城镇用地增加的重心由下游地区转移到上游地区。

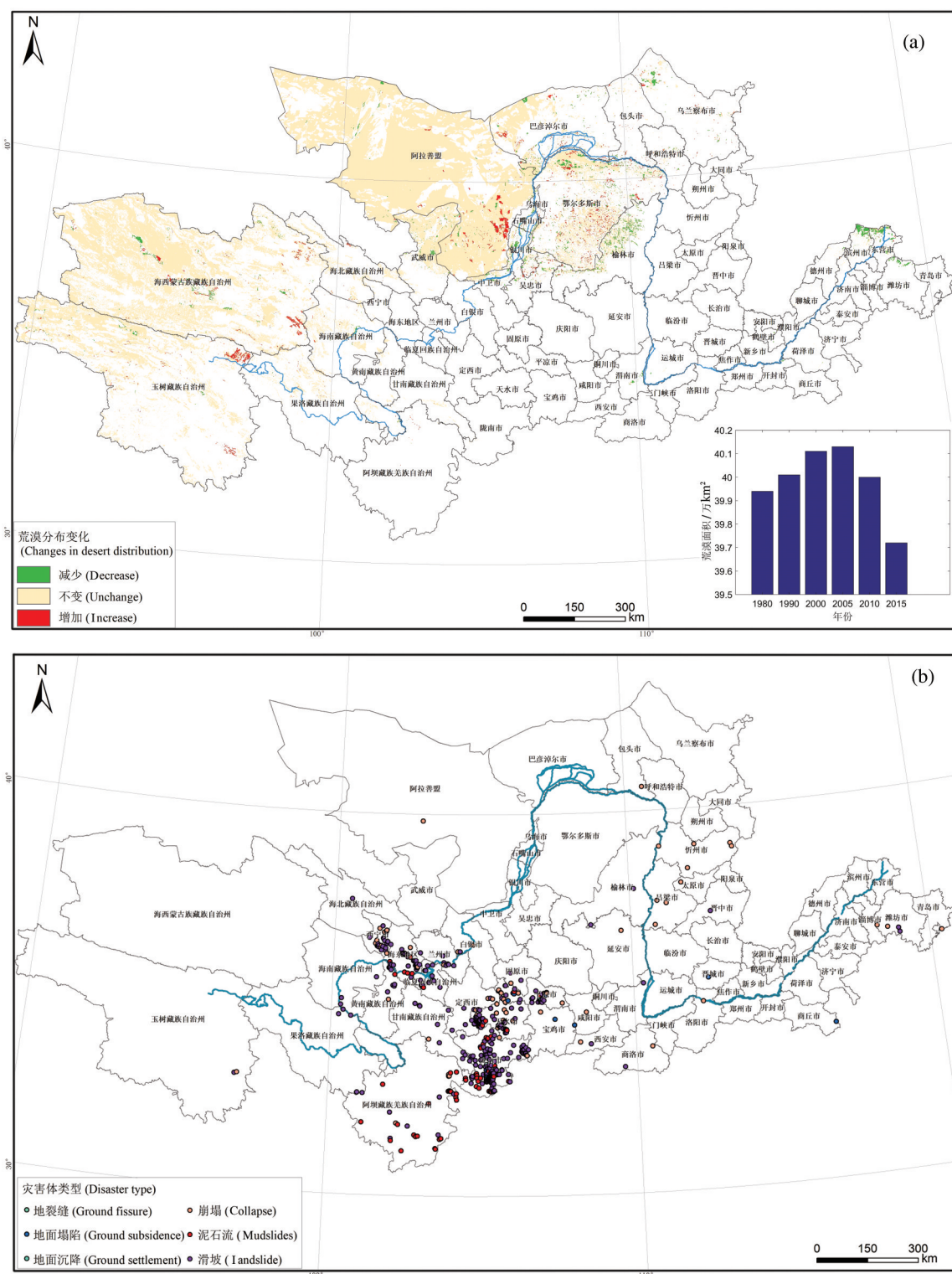


图7 荒漠化趋势格局图(a)及地质灾害分布图(b)

Fig.7 Desertification trend pattern (a) and distribution map of geological hazards(b)

夜间灯光变化可反映城镇用地变化。2000—2010年间,黄河流域整个下游地区和部分中上游地区夜间灯光变化呈增加趋势,其中,西安市、西宁

市、郑州市、延安市等地区灯光增加明显。整体灯光增加趋势由下游地区向中上游扩散。中上游地区灯光增加地区分布呈现出由轴线连接的多个核

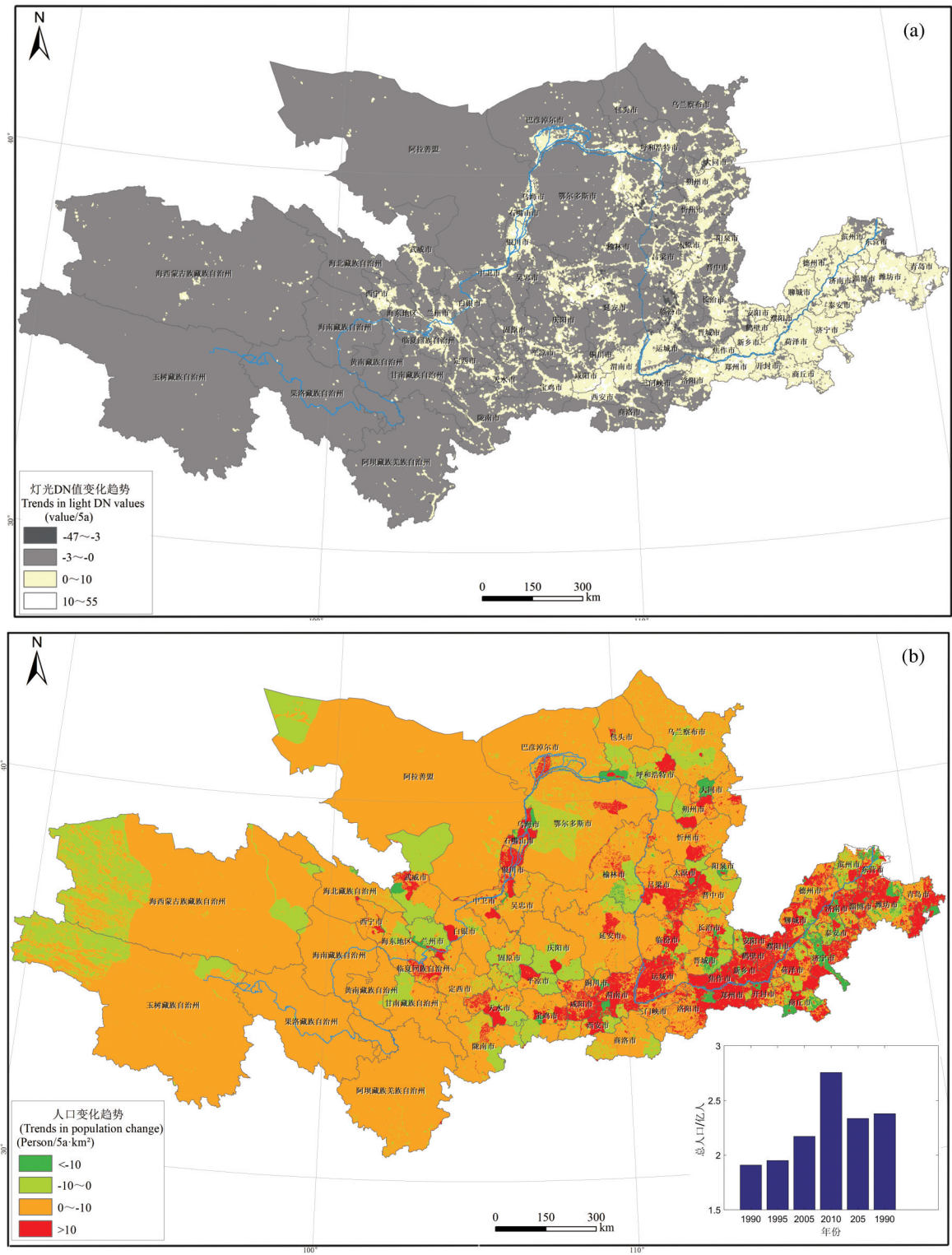


图8 夜间灯光变化(a)及人口变化趋势格局图(b)
Fig.8 Pattern of night light change trend (a) and population change trend(b)

心的组团分布特征,以几个省会城市为核心呈现明显的放射状分布,东西差异较大。

4.10 人口格局变化

人口分布重心进一步向东偏离,沿中心城市、干流、交通干线增加。

黄河流域人口空间分布具有沿河干道、沿交通干线增加的特征。下游地区、中游渭河河谷—汾河河谷地区、京包—包兰线沿线地区,人口显著增加,是人口密集地(图8b)。人口增加趋势最大的地区为西安市、太原市、济南市等大城市及其周边地区和河南省大部分地区。上游地区人口相对稀疏,青海和内蒙地区人口变动较小。其中,1990—1995年间,河南省人口显著减少,山东省、西安市等地的人口显著增加,呈现出高低集聚的分布特点。1995—2000年间,人口变化格局转变很大,河南省人口显著增加,而山东部分地区人口显著减少。2000年后,河南省仍然保持人口高增长,甘肃、陕西省内部人口变动差异拉大,省内人口显著增加、减少地区交错分布。2005—2010年间,人口显著增加区域呈多中心分布,四周区域人口显著减少。

黄河流域人口空间分异呈现出“点轴圈”的空间结构模式。整个流域的人口分布沿黄河干道由下游往上,人口密集程度呈梯度递减的特征。流域下游地区的济南、郑州等发达城市是整个流域的人口分布核心区,在上游和中游地区有兰州、包头、太原、西安等城市或区域政治中心为二级核心区。黄河干流和主要支流渭河、汾河以及主要的铁路干线都是黄河流域人口分布的主要轴线。

4.11 经济格局变化

GDP整体呈现上涨趋势,呈现由东向西递减、由干流或主支流沿岸向两边递减、由中心城市向周围递减的特点。

黄河流域经济空间“东重西轻”、经济重心偏东。经济活动沿干流及渭河、汾河等主要支流集聚,构成了黄河流域经济空间的主要轴线。

黄河流域GDP整体呈现上涨趋势,呈现由东向西递减,由干流或主要支流沿岸向两边递减,由济南、郑州、太原、兰州等区域性中心城市向周围递减的特点。其中,在1995—2000年间,GDP增长涨幅最大的区域主要集中在山东、河南两省。GDP增长分布很不平衡,呈高低集聚。进入2000年以后,

GDP增长分布除了太原部分地区呈降低趋势外,黄河流域涨幅整体上呈现由东向西递减的态势,涨幅最大的区域仍然集中在山东、河南两省。在2005—2010年间,山东、河南两省大部分地区GDP增长趋于停滞甚至略微降低,GDP增长的重心转移到黄河中上游地区(图9)。

5 重大地质资源环境问题识别与地质工作建议

5.1 流域重大地质资源环境问题

由黄河流域资源环境系统近40年的变化可看出,黄河流域地质环境总体脆弱,资源环境承载能力低,目前面临复杂的地质资源环境问题。主要包括:

(1)水沙问题。一是入河泥沙增加问题。黄河河套盆地存在入河泥沙增加问题,乌海段自宁夏交界处至磴口,该段西部乌兰布和沙漠向东进给,东部黄土沟谷侵蚀,二者均造成进入黄河泥沙增加。二是下游沙量锐减问题。受流域气候改变、植被与河流驱动因素调整、多库联合调水调沙等影响,现阶段黄河水量和沙量减少已达20%和85%以上,库区共淤积泥沙30亿 m^3 ,造成进入下游的沙量锐减。水沙变化表面上是会对黄河下游及河口三角洲的河势流路、滩槽形态、河海关系、湿地退化等产生影响,更重要的是,会流域生态环境产生全新和重大影响。三是悬河稳定性问题。黄河不仅下游为“地上河”,上游临河段成为“地上河”,洪水风险严峻,尤其是下游河道和滩区多形成“二级悬河”,更是增加了洪水风险。

(2)生态问题。一是生态退化问题。黄河上游水源涵养区生态退化明显,三江源地区、甘南和祁连山地区均存在草地沙化、湿地草甸缩小等生态环境退化问题。二是生态环境破坏问题。黄河滩区生活有190万以上的人口,近年来,在耕地面积变化不大的情况下,建筑面积逐渐增加,造成滩区生态环境的逐渐破坏,受洪水威胁。

(3)沿岸土壤问题。一是土壤侵蚀问题。黄河晋陕峡谷段黄土侵蚀严重,是主要的产沙段,尤其是西部黄土高原,黄土高原沟谷发育和黄河阶地相对应,下游阶地级数多,黄土侵蚀破碎严重,沟谷长;上游阶地级数少,黄土较为完整,沟谷较短,黄河晋陕峡谷段演化过程控制了黄土侵蚀特征。汾

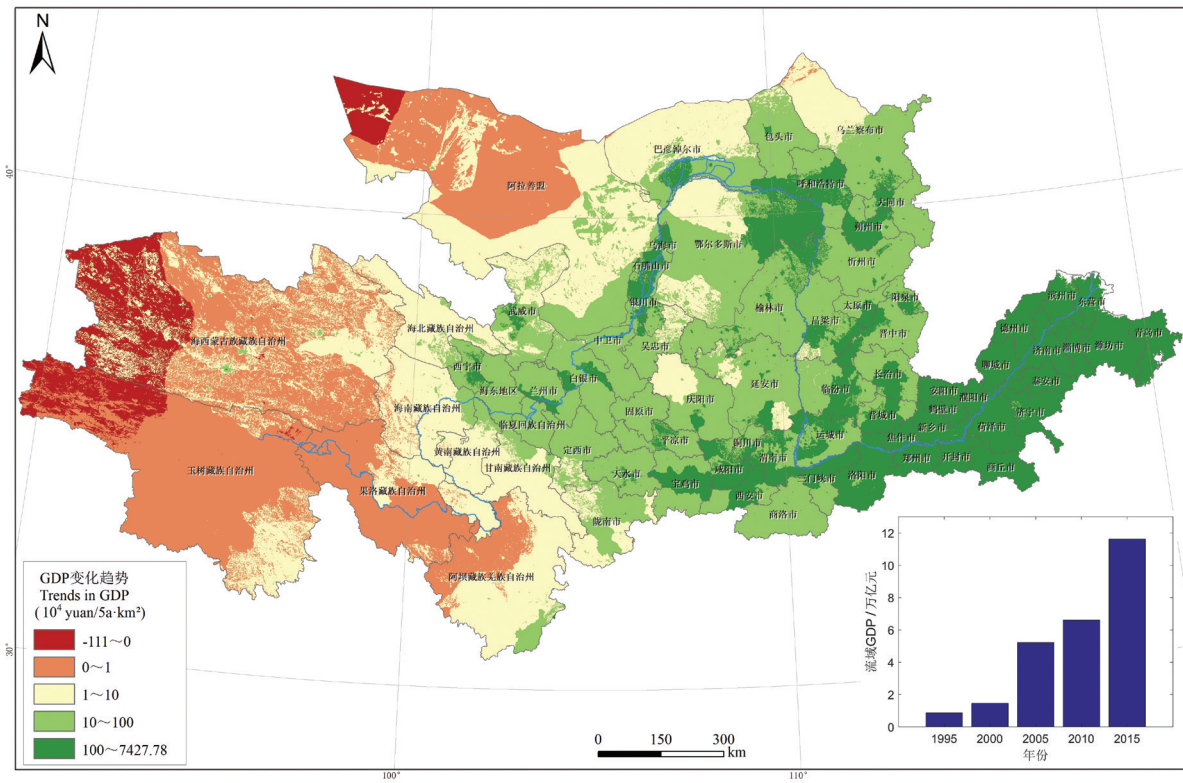


图9 GDP变化趋势格局图
Fig.9 Trend pattern of GDP changes

河地堑地区黄土侵蚀强烈,第四纪早中期发育的河流也对盆地边缘的黄土造成侵蚀强烈,黄土多支离破碎,很少残留塬面,沟谷多为老年U型沟谷。二是盐渍化问题。黄河出磴口后进入临河拗陷,临河拗陷内黄河形成堆积地貌,发育天然堤、河床等地貌类型,多形成地上河,尤其是全新世自北向南分布不同时期的古河道,造成临河地区盐渍化严重。

(4)污染问题。一是矿山开采区环境污染问题。黄河支流沿岸区域矿山开采,导致环境破坏。二是农业面源污染问题。山东省黄河滩区近2000 km²,滩区贫困发生率高达7.2%,存在农业面源污染、河流底泥污染问题,是山东省省脱贫攻坚战的重要战场。

5.2 地质工作建议

(1)以地球系统科学理论为指导对黄河流域重大资源环境问题进行系统调查研究。

黄河流域从剥蚀区形成物源,包括风化剥落的颗粒沉积物和溶解物,搬运到沉积区或汇水盆地中最终沉积下来,是一个整体,是从山到盆的整个地球表层动力学过程、深部岩石圈动力学过程与地球

表面物理、化学与生物及气候条件等相互作用的产物。因此,需要从深部、浅部构造、河流侵蚀、盆地沉积、风成沉积、气候变化、植物演替和海平面变化等方面,以地球系统科学理论为指导对黄河流域重大地质资源环境问题进行系统调查研究。

水问题调查研究。①围绕上游水源涵养问题,揭示气候变化引起的降水量差异性变化-冻结层融化-生态退化-下垫面及水源涵养条件退化响应机制,提出应对措施。②围绕中游水土侵蚀问题,揭示极端降水增大、植被生态环境好转和黄河泥沙量锐减的背景下黄土斜坡水文-应力响应机制,查明滑坡崩塌泥石流重力侵蚀演化趋势及淤地坝溃决风险,提出新时代水土保持和防灾减灾之策。③围绕全流域水资源优化配置问题,研究面向山水林田湖草生命共同体的水资源评价与优化配置理论与方法,建立黄河流域水文站监测数据共享机制,开展全流域地下水与地表水、上游中游与下游、干流与支流等水资源再评价、再优化、再配置。

生态问题调查研究。查明黄河中上游生态退化类型和分布,揭示其退化机制,提出生态保护与

修复模式,开展黄河中上游生态自然修养与人工修复区划,建立典型地区修复示范。

水土污染问题调查研究。查明黄河中上游水土污染类型及其污染机理,提出水土污染治理模式和关键技术。重点地区:鄂尔多斯盆地能源基地、关中平原城市群、兰州—西宁城市群、宁夏沿黄经济区、下游引黄灌区等。

土地资源及其利用问题调查研究。查明黄河中上游土地资源的数量、质量和生态,结合国土资源三调资料,开展黄河中上游重点地区土地利用区划。开展黄河韩城—潼关段、渭河盆地、银川盆地、河套盆地等河滩用地洪水淹没风险和土地质量调查,提出河滩用地管理办法。

城市地质问题调查研究。查明关中平原城市群、兰州—西宁城市群、黄河“几”字弯都市圈等自然资源、地质环境条件和环境地质问题,通过“双评价”,发掘地区比较优势,优化国土空间规划,推动沿黄地区中心城市及城市群高质量发展。

地质遗迹调查研究。查明黄河中上游地质遗迹与地质景观,充分认识黄河在我国古人类、古文化的起源、繁衍和发展中极其重要的作用,拓宽领域、学科渗透,加快黄河文化研究的步伐,打造具有国际影响力的黄河文化旅游带。

矿山地质环境问题调查研究。查明黄河中上游大型矿业基地矿山地质环境问题现状,建立矿山地质环境问题自然恢复与人工修复技术方法体系,研发修复关键技术,提出黄河中上游矿山绿色开发与生态修复总体方案。

关键矿产绿色调查研究。查明国家级能源基地、紧缺关键矿产资源基地的潜力,以及关中、柴达木及民和等盆地富氢天然气潜力,提出绿色勘查和开发方案。

重大水利工程环境效应调查研究。黄河中上游已建有12个水利枢纽或水电站,具有防洪、减淤、供水、发电、灌溉等综合效益。在生态优先、量水而行、节水为重的前提下,重新审视重大水利工程综合环境效应。

大数据与人工智能研究。构建数字黄河,基于地质云,形成支撑自然资源管理的黄河流域自然资源与国土空间智能管理系统。

重大科技问题调查研究:研究地质过程、气候

变化、人类活动多重因素驱动下,黄河形成演化机制、资源环境效应、粮食—能源—水关联关系及黄河流域国土空间生态保护修复等问题。

(2)以地球系统科学研究方法为框架,进行跨学科协作,整合区域性地质调查工作。

黄河流域生态保护和高质量发展是一个复杂的系统工程。黄河流域自然资源与环境因素复杂,地质背景差异巨大,因此单一学科的研究方式已经不能很好地承担区域地质调查工作。在新时代的背景下,黄河流域地质调查工作的主要方式应基于地球系统科学理论和研究方法,进行多学科协作的综合调查和集成。加强黄河流域大保护的多学科交叉研究,为大保护提供科技支撑。如科学布局黄河流域保护地网络,应对气候变化与人类活动对流域生态演变影响的研究、监测、评估和有效管理等。目前黄河流域的资源环境与生态本底还不是很清楚。应该以地球系统科学为指导,开展一次系统性的黄河生态本底的调查工作,进一步系统地识别自然资源、生态环境问题,包括产业与生态保护的相互协调关系,生态破坏的深层原因等。同时,基于这次调查的结果开展生态资产的评估工作,量化评估黄河流域的生态价值。为了增强流域管理与宏观调控,改善生态环境,加强水生生物资源保护,需要推广从山顶到海洋的流域生态系统综合管理理念,利用现代生态系统管理理论,建立汇报卡制度(Blatt, 2011),实现黄河流域上下游一体化管理。

6 结 论

以地球系统科学理论为指导,利用多源多时相调查研究数据,分析黄河流域近40年气候、山区、水文等十一大类资源环境格局变化及区域分异规律,考察黄河流域面临的资源环境重大问题与40年发展成效,并做出评价,最终得出以下结论:

(1)流域资源环境格局变化显著并呈区域分异规律。气候整体暖干化趋势明显,局部出现暖湿现象;山区生态系统脆弱、逐步恢复,局部人类活动影响剧烈;水体与湿地面积总体减少,近年呈增加趋势,径流量呈减少趋势,部分干支流污染严重,水生生物多样性减少;农田面积呈下降趋势,下游地区农田生产潜力增加明显;植被覆盖呈现整体缓慢升高、局部退化趋势;草地面积持续减少,草地生态系

统退化明显;荒漠化扩展态势得到遏制,总体形势依然严峻;自然灾害频发,水害严重,地质灾害聚集分布,形成陇中黄土高原和陇南山地两个高发区;城镇建设用地面积持续上升,由下游地区向中上游扩散,中上游呈现出由轴线连接的多个核心的组团分布特征;人口分布重心进一步向东偏离,沿中心城市、干流、交通干线增加;GDP整体呈现上涨趋势,呈现由东向西递减、由干流或主流沿岸向两边递减、由中心城市向周围递减特点。

(2)资源环境变化背景下黄河流域生态问题复杂多样,生态退化问题、入河泥沙增加问题、盐渍化问题、土壤侵蚀问题、下游沙量锐减问题、生态环境破坏问题、悬河稳定性问题、矿山开采区环境污染问题、农业面源污染问题等。

(3)建议以地球系统科学理论为指导,进行跨学科协作,整合区域性地质调查工作,对黄河流域重大资源环境问题进行系统调查研究:开展水问题调查研究、生态问题调查研究、水土污染问题调查研究、土地资源及其利用问题调查研究、城市地质问题调查研究、地质遗迹调查研究、矿山地质环境问题调查研究、关键矿产绿色调查研究、重大水利工程环境效应调查研究、大数据与人工智能研究、重大科技问题调查研究等。

References

- B.T.Трофимов, Liu Baiqiu. 1995. The stability and influencing factors of geological environment [J]. *Journal of Geological Sciences*, (2): 90-92.
- Blatt H. 2011. *America's environmental report card: Are we making the grade?*[M]. MIT Press.
- Cao Wenhong. 2003. Promoting water-saving soil and water Conservation in loess Plateau region [J]. *Chinese Science of Soil and Water Conservation*, (1):41- 44(in Chinese with English abstract).
- Chen Qiong, Zhang Ytterbium Li, Liu Fenggui, Zhou Qiang, Wang Shengzhen, Cheng Yi, Guo Rong, Zhi Zemin, Xu Huange. 2020. Research review on land use change and its impact in the headwaters of the Yellow River Basin [J]. *Resources Science*, 42(3): 446-459(in Chinese with English abstract).
- Chen Yingyu, Wang Yonggui, Zhou Xiangyang. 2008. Desertification status and driving force of the source area of the Yellow River [J]. *Journal of Qinghai University (Natural Science edition)*, (4):71-76, 80(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhikun, Zhang Shuyu, Luo Jiali, Li Zhaorong. 2013. Climatic analysis of precipitation anomalies in northwest China [J]. *China Desert*, 33(6):1874-1883(in Chinese with English abstract).
- Dong Suocheng, Zhou Changjin, Wang Haiying. 2002. Major Ecological environmental problems and countermeasures in the "Three River Sources" area [J]. *Journal of Natural Resources*, (6): 713-720(in Chinese with English abstract).
- Du Jiaju, Chen Zhiwei. 2010. Path analysis using SPSS linear regression [J]. *Biology Bulletin*, 45 (2): 4- 6(in Chinese with English abstract).
- Du Jizeng, Wang Genxu, Li Yuanshou. 2015. Analysis on the characteristics and causes of alpine grassland degradation in the source area of the Yangtze and Yellow River in recent 45 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 24(06):5- 15(in Chinese with English abstract).
- Fang Zhi, Xu Weihua, Zhang Jingjing, Xiao Yi, Zhang Lu. 2017. Planning of nature conservation system of qinling Ridge System based on biodiversity and ecosystem service function [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(16): 5334- 5341(in Chinese with English abstract).
- Guo Jia, Wei Wei, Yu Yilei, Song Xiangjing, Zhang Manyin, Li Shengnan. 2015. Research progress on eutrophication of Wuliangsu Sea Wetland [J]. *Journal of Ecology*, 34(11):3244-3252 (in Chinese with English abstract).
- Han Dayong, Yang Yongxing, Yang Yang, Li Ke. 2012. Research progress on wetland degradation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(4): 289-303(in Chinese with English abstract).
- Huang Qi. 2012. *GIS Based Study on Ecological Environment Change and Human Activities in Sanjiangyuan Area* [D]. Beijing:Minzu University of China(in Chinese with English abstract).
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: impacts, Adaptation, and Vulnerability: Part A*[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 1132(in Chinese with English abstract).
- Jiang Lianjie. 2006. Analysis of water pollution in the Yellow River basin and water environment protection measures [J]. *Water Resources Protection*, (1):64-67(in Chinese with English abstract).
- Li Hongchao, Sun Yongjun, Li Xiaoqin, Bi Erping. 2013. Desertification characteristics and influencing factors in the middle reaches of the Yellow River [J]. *Remote Sensing of Land Resources*, 25(2):143-148(in Chinese with English abstract).
- Li Renshi, Shao Zhitao, Zhang Honghong, An Zhihong. 2014. Spatio-temporal evolution and causes of desertification in the Upper Yellow River in recent 30 years [J]. *World Geology*, 33(2):494-503 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuai. 2015. *Climate and Land Use Change and Its Impact on Runoff in Ningxia Yellow River Basin* [D]. Chongqing:Southwest University(in Chinese with English abstract).
- Li Yuhong, Shang Xiaocheng. 2001. Analysis on the current situation and change of the pollutant carrying capacity of the Yellow River trunk Stream [J]. *Water Resources Protection*, (1):41- 44, 62(in

- Chinese with English abstract).
- Lian Luharre, Liu Binhui. 2019. Variation characteristics of dry and wet periods in northwest China in recent 58 a [J]. *Arid Region Geography*, 42(06):1301–1309(in Chinese with English abstract).
- Liu Dexiang, Dong Anxiang, Deng Zhenyong. 2005. Effects of climate warming on agriculture in northwest China [J]. *Journal of Natural Resources*, (1):119–125(in Chinese with English abstract).
- Lü Zhenyu, Mu Jianxin. 2017. Study on the temporal and spatial evolution characteristics of water pollution in the Yellow River Basin [J]. *People's Yellow River*, 39(4):66–70, 77(in Chinese with English abstract).
- Ma Guanghui. 2007. Impact of Water Resources Development and Utilization on Hydrological Cycle and Ecological Environment in the Yellow River Basin [D]. Nanjing: Hohai University(in Chinese with English abstract).
- Pan Jinglu. 2013. Impact of Habitat Pressure Development on Biodiversity Conservation in Qinling Mountains [D]. Beijing: Beijing Forestry University(in Chinese with English abstract).
- Pei Yixuan, Guo min. 2001. Basic principle and application of moving average method [J]. *Journal of Gun Launching and Control*, (1): 21–23(in Chinese with English abstract).
- Peng Bo, Ge Lei, Wang Ruiling, Liu Bo, Lou Guangyan, Huang Wenhai. 2015. Simulation analysis of the impact of Ecological replenishment on groundwater of Diaokou River in the Yellow River Delta [J]. *Water Resources Protection*, 31(5):1–6(in Chinese with English abstract).
- Ren Jingyu, Zhao Junxia, Ma Hongbin, Peng Shouzhang, Li Bingyin. 2019. Prediction of temporal and spatial distribution trend of climate change in four seasons in the Loess Plateau from 2015–2100 [J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 39 (05): 262–271, 347–348(in Chinese with English abstract).
- Shen Fang, Huang Run Qiu, Miao Fang, Luo Wenqiang. 1999. GIS technology for regional geological environment assessment and disaster prediction [J]. *Acta Monolinica Sinica*, (4):338–342(in Chinese with English abstract).
- Shen huaifei. 2007. Landscape Pattern Change of the Yellow River Basin in Western Henan Province Based on 3S [D]. Kaifeng:Henan University(in Chinese with English abstract).
- Shen Zhenyao, Yang Zhifeng, Cao Yu. 2003. Review of environmental vulnerability research [J]. *Geoscience and Technology Information*, (3): 91–94(in Chinese with English abstract).
- Shi Jianguo, Yan Changrong, he Wenqing, Liu Keli. 2008. Study on temporal and spatial pattern of water deficit in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, (1): 113–119(in Chinese with English abstract).
- Tian Hong, Li Chun, Zhang Shiyang. 2005. Climate change in the Yangtze Huaihe River Basin in recent 50 years [J]. *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, (4): 539–544 (in Chinese with English abstract).
- Tian Zhizhi, Zhang Dandan, He Xiaohui, Guo Hengliang, Wei Haitao. 2019. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation net primary productivity and its driving factors in the Yellow River Basin from 2000 to 2015 [J]. *Soil and Water Conservation*, 26 (2): 255–262(in Chinese with English abstract).
- Wang Fang. 2012. Research on Ecological Asset Valuation of Qilian Mountain Nature Reserve [D]. Lanzhou:Lanzhou University(in Chinese with English abstract).
- Wang Guan, Zhang Kai, Liu Jing. 2020. Is Northwest China warming and getting wet? [J]. *Ecological Economy*, 36(1):9–12(in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Zhang Mao, Yang Jianfeng. 2019. Vulnerability assessment of geological environment in China [J]. *Northwest Geology*, 52(2): 198–206(in Chinese with English abstract).
- Wang Youkui, Guo Shengxiang, Wang Jie, Yuan Hong, Xu Berin, Wang Doyao. 2013. Evaluation of forest ecosystem Service value in Qilian Mountain National Nature Reserve, Gansu [J]. *China Desert*, 33(6):1905–1911(in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Chen Ruishan, Xia Zilong, Guo Chihui. 2020. The evaluation of ecosystem service value and its spatial change in the Yellow River Basin and suggestions from the ecological geology perspectives[J].*Geological Bulletin of China*,39(10):1650–1662 (in Chinese with English abstract).
- Wen Qingke, Zhang Zengxiang, Xu Jinyong, Zuo Lijun, Wang Xiao, Liu Bin, Zhao Xiaoli, Yi Ling. 2011. Remote sensing monitoring and analysis of temporal and spatial pattern changes of coastal wetlands around Bohai Sea [J]. *Acta Remote Sensing*, 15 (1): 183–200(in Chinese with English abstract).
- Wu Shaohong, Zhao Yan, Tang QiuHong, Zheng Jingyun, Gao Jiangbo, Liang Tao. 2015. Land surface pattern research for the future Earth project[J]. *Progress in Geographic Sciences*, 34 (1): 10–17(in Chinese with English abstract).
- Wu Shaohong, Zhao Zongci. 2009. The latest scientific cognition of climate change and water [J]. *Climate Change Research Progress*, 5 (3): 125–133(in Chinese with English abstract).
- Xi Jinping. 2019. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Development and Management*, (11):1–4(in Chinese with English abstract).
- Xie Gaodai, Zhang Caixia, Zhang Changshun. 2015. Value of ecosystem services in China [J]. *Resource Science*, 37(9):1740–1746(in Chinese with English abstract).
- Xu zongxue, Zhang Nan. 2006. Analysis of precipitation change trend

- in the Yellow River Basin in recent 50 years [J]. *Geographic Research*, (1): 27–34(in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Jiang Zhihong, Liu Xiaoyun, Yue Ping. 2012. Analysis of dry– wet evolution and sustainable characteristics in northwest China in the past half century [J]. *Arid Region Geography*, 35(1): 10–22(in Chinese with English abstract).
- Yang Wei, Pei Jun, Li Xiaoxiao, Sun Tao, Wang Wenyan. 2018. Systematic evaluation and countermeasures on ecological restoration effect of degraded wetlands in the Yellow River Delta [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science edition)*, 54(1):98–103(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lijun. 2005. Vulnerability assessment of geological environment for mineral resource exploitation in Qinghai Province based on GIS multi– criterion spatial analysis (SMCE) [J]. *Geology in China*, 32 (3):518–522(in Chinese with English abstract).
- Zhang Peilan, Wang Hao, Lei Xiaohui, Wang Xu. 2017. A review of studies on wetland ecological replenishment [J]. *People's Yellow River*, 39(9):64–69(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qiang, Zhang Cunjie, Bai Huzhi, Li Lin, Sun Landong, Liu Dexiang, Wang Jinsong, Zhao Hongyan. 2010. New dynamics of climate change in northwest China and its impact on drought Environment -- overall warming and drying, and signs of local warming and humidity [J]. *Drought Meteorology*, 28(1):1– 7(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yangzheng, Liu Jing, Lu Fang. 2014. Discussion on ecological replenishment of Wetland in Yellow River Delta [C]//Chinese Society of Water Resources(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yutian, Li, Liu Linshan, Bai Wanqi, Shen Zhenxi, Yan Jianzhong, Ding Mingjun, Li Shuangcheng, Zheng Du. 2006. Spatial characteristics of grassland degradation in the source area of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, (1):3– 14(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xinquan, Zhou Huakun. 2005. Ecological environmental degradation, restoration and governance and sustainable development in Sanjiangyuan District [J]. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, (6):37–42(in Chinese with English abstract).
- Zhuo Junling, Ge Lei, Shi Xueting. 2013. Study on ecological replenishment of freshwater Wetland at the mouth of Yellow River [J]. *Journal of Water Ecology*, 34(2):14–21(in Chinese with English abstract).
- 科学, (1):41–44.
- 陈琼, 张懿铨, 刘峰贵, 周强, 汪生珍, 成艺, 郭蓉, 支泽民, 许寰. 2020. 黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述[J]. *资源科学*, 42(3):446–459.
- 陈英玉, 王永贵, 周向阳. 2008. 黄河源区荒漠化现状及其驱动力研究[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, (4):71–76+80.
- 陈志昆, 张书余, 雒佳丽, 李照荣. 2013. 中国西北地区降水异常的气候分析[J]. *中国沙漠*, 33(6):1874–1883.
- 董锁成, 周长进, 王海英. 2002. “三江源”地区主要生态环境问题与对策[J]. *自然资源学报*, (6):713–720.
- 杜际增, 王根绪, 李元寿. 2015. 近45年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析[J]. *草业学报*, 24(6):5–15.
- 杜家菊, 陈志伟. 2010. 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J]. *生物学通报*, 45(2):4–6.
- 房志, 徐卫华, 张晶晶, 肖焱, 张路. 2017. 基于生物多样性与生态系统服务功能的秦岭山系自然保护体系规划[J]. *生态学报*, 37(16): 5334–5341.
- 郭嘉, 韦玮, 于一雷, 宋香静, 张曼胤, 李胜男. 2015. 乌梁素海湿地富营养化研究进展[J]. *生态学杂志*, 34(11):3244–3252.
- 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 李珂. 2012. 湿地退化研究进展[J]. *生态学报*, 32(4):289–303.
- 黄琦. 2012. 基于GIS的三江源地区生态环境变化与人类活动影响研究[D]. 北京:中央民族大学.
- 蒋廉洁. 2006. 黄河流域水污染分析与水环境保护措施[J]. *水资源保护*, (1):64–67.
- 李红超, 孙永军, 李晓琴, 毕二平. 2013. 黄河中游地区荒漠化变化特征及影响因素[J]. *国土资源遥感*, 25(2): 143–148.
- 李任时, 邵治涛, 张红红, 安志宏. 2014. 近30年来黄河上游荒漠化时空演变及成因研究[J]. *世界地质*, 33(2):494–503.
- 李帅. 2015. 宁夏黄河流域气候与土地利用变化及其对径流影响研究[D]. 重庆:西南大学.
- 李玉洪, 尚晓成. 2001. 黄河干流纳污量现状及其变化分析[J]. *水资源保护*, (1):41–44, 62.
- 廉陆鹂, 刘滨辉. 2019. 近58 a我国西北地区干期与湿期变化特征[J]. *干旱区地理*, 42(6): 1301–1309.
- 刘德祥, 董安祥, 邓振镛. 2005. 中国西北地区气候变暖对农业的影响[J]. *自然资源学报*, (1): 119–125.
- 吕振豫, 穆建新. 2017. 黄河流域水质污染时空演变特征研究[J]. *人民黄河*, 39(4):66–70, 77.
- 马广慧. 2007. 黄河流域水资源开发利用对水文循环及生态环境的影响研究[D]. 南京:河海大学.
- 潘景璐. 2013. 基于生境压力的发展对秦岭生物多样性保护影响研究[D]. 北京:北京林业大学.
- 裴益轩, 郭民. 2001. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. *火炮发射与控制学报*, (1):21–23.
- 彭勃, 葛雷, 王瑞玲, 刘波, 姜广艳, 黄文海. 2015. 黄河三角洲刁口河

附中文参考文献

- В.Т.Трофимов, 刘柏秋. 1995. 地质环境稳定性及其影响因素[J]. *地质科学译丛*, (2):90–92.
- 曹文洪. 2003. 黄土高原地区提倡节水型水土保持[J]. *中国水土保持*

- 生态补水对地下水影响的模拟分析[J]. 水资源保护, 31(5):1-6.
- 任婧宇, 赵俊侠, 马红斌, 彭守璋, 李炳垠. 2019. 2015—2100年黄土高原四季气候变化的时空分布趋势预测[J]. 水土保持通报, 39(5):262-271, 347-348.
- 申怀飞. 2007. 基于3S的豫西黄河流域景观格局变化研究[D]. 开封: 河南大学.
- 沈芳, 黄润秋, 苗放, 罗文强. 1999. 区域地质环境评价与灾害预测的GIS技术[J]. 山地学报, (4):338-342.
- 沈珍瑶, 杨志峰, 曹瑜. 2003. 环境脆弱性研究述评[J]. 地质科技情报, (3):91-94.
- 史建国, 严昌荣, 何文清, 刘克礼. 2008. 黄河流域水分亏缺时空格局变化研究[J]. 自然资源学报, (1):113-119.
- 田红, 李春, 张士洋. 2005. 近50年我国江淮流域气候变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), (4):539-544.
- 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 郭恒亮, 魏海涛. 2019. 2000-2015年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子[J]. 水土保持研究, 26(2):255-262.
- 汪有奎, 郭生祥, 汪杰, 袁虹, 徐柏林, 王多尧. 2013. 甘肃祁连山国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估[J]. 中国沙漠, 33(6):1905-1911.
- 王方. 2012. 祁连山自然保护区生态资产价值评估研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- 王冠, 张凯, 刘静. 2020. 中国西北正在变暖变湿吗?[J]. 生态经济, 36(1):9-12.
- 王尧, 陈睿山, 夏子龙, 郭迟辉. 2020. 黄河流域生态系统服务价值变化评估及生态地质调查建议[J]. 地质通报, 39(10):1650-1662.
- 王尧, 张茂省, 杨建锋. 2019. 中国地质环境脆弱性评价[J]. 西北地质, 52(2):198-206.
- 温庆可, 张增祥, 徐进勇, 左丽君, 汪潇, 刘斌, 赵晓丽, 易玲. 2011. 环渤海滨海湿地时空格局变化遥感监测与分析[J]. 遥感学报, 15(1):183-200.
- 吴绍洪, 赵艳, 汤秋鸿, 郑景云, 高江波, 梁涛等. 2015. 面向"未来地球"计划的陆地表层格局研究[J]. 地理科学进展, 34(1):10-17.
- 吴绍洪, 赵宗慈. 2009. 气候变化和水的最新科学认知[J]. 气候变化研究进展, 5(3):125-133.
- 习近平. 2019. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 水资源开发与管理, (11):1-4.
- 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 2015. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 37(9):1740-1746.
- 徐宗学, 张楠. 2006. 黄河流域近50年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, (1):27-34.
- 杨金虎, 江志红, 刘晓芸, 岳平. 2012. 近半个世纪中国西北干湿演变及持续性特征分析[J]. 干旱区地理, 35(1):10-22.
- 杨薇, 裴俊, 李晓晓, 孙涛, 王文燕. 2018. 黄河三角洲退化湿地生态修复效果的系统评估及对策[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 54(1):98-103.
- 张丽君. 2005. 基于GIS多准则空间分析(SMCE)的青海省矿产资源开发地质环境脆弱性评价[J]. 中国地质, 32(3):518-522.
- 张珮纶, 王浩, 雷晓辉, 王旭. 2017. 湿地生态补水研究综述[J]. 人民黄河, 39(9):64-69.
- 张强, 张存杰, 白虎志, 李林, 孙兰东, 刘德祥, 王劲松, 赵红岩. 2010. 西北地区气候变化新常态及对干旱环境的影响——总体暖干化, 局部出现暖湿迹象[J]. 干旱气象, 28(1):1-7.
- 张仰正, 刘静, 路芳. 2014. 黄河三角洲湿地生态补水探讨[C]//中国水利学会. 科技创新与水利改革——中国水利学会2014学术年会论文集(上册). 中国水利学会, 167-172.
- 张懿铨, 刘林山, 摆万奇, 沈振西, 阎建忠, 丁明军, 李双成, 郑度. 2006. 黄河源地区草地退化空间特征[J]. 地理学报, (1):3-14.
- 赵新全, 周华坤. 2005. 三江源区生态环境退化、恢复治理及其可持续发展[J]. 中国科学院院刊, (6):37-42.
- 卓俊玲, 葛磊, 史雪廷. 2013. 黄河河口淡水湿地生态补水研究[J]. 水生态学杂志, 34(2):14-21.