

DOI: 10.5846/stxb202012293308

宁瑶, 刘雅莉, 杜剑卿, 杨雅茜, 王艳芬. 黄河流域可持续发展评估及协同发展策略. 生态学报, 2022, 42(3): 990-1001.

Ning Y, Liu Y L, Du J Q, Yang Y Q, Wang Y F. Sustainable development assessment of the Yellow River Basin and the coordinated development strategy. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 990-1001.

黄河流域可持续发展评估及协同发展策略

宁 瑶¹, 刘雅莉^{2,*}, 杜剑卿^{1,3}, 杨雅茜⁴, 王艳芬^{2,3,5}

1 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 中国科学院大学, 燕山地球关键带与地表通量国家野外科学观测研究站, 北京 100049

4 中国科学院大学中丹学院, 北京 101408

5 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

摘要: 作为我国重要的生态屏障和经济带, 黄河流域生态保护和高质量发展是我国的重大战略需求。目前, 黄河流域水资源利用效率较低、水资源配置不甚合理等问题, 阻碍了流域整体的可持续发展。以黄河流域上、中、下游 9 个省份作为研究对象, 引入目标间均衡度这一新的评估方法, 通过分析上中下游在可持续发展目标达成状况、发展路径、对黄河水资源的依赖程度和工农业用水效率等方面的差异, 探讨了基于水资源优化利用的协同发展策略。研究结果表明: (1) 2000—2015 年间, 黄河九省的可持续发展指数都有了显著提高, 在不考虑各可持续发展目标间的均衡度时, 中下游地区的可持续发展状况显著优于上游地区, 考虑均衡度后则未发现显著差异; (2) 忽略均衡度对评估结果带来的偏差也体现在省级层面上, 如宁夏和山西在不考虑均衡度时都被认为取得了良好的发展, 但实际上两者的发展主要体现在少部分目标上, 和环境保护相关的部分目标反而出现了退步, 这说明不考虑均衡度可能会高估可持续发展目标达成度; (3) 黄河流域上中下游均有对黄河水资源较为依赖的省份, 这些省份间工农业用水量和用水效率等存在较大差异, 总体来看, 上游地区用水效率较低, 中下游地区用水效率较高; (4) 取水量与 17 个可持续发展目标间的关系在上中下游有所差异, 在上游地区取水量同多数目标无关或呈负相关关系, 说明限制上游地区可持续发展的因素不是水资源, 而在中下游地区取水量的增加则能够促进一些同经济和社会发展相关的目标。可以通过加强上、中、下游间的合作, 优化产业结构和水资源配置, 提高流域整体的水资源利用效率, 促进流域生态环境保护, 最终实现全流域的可持续发展。

关键词: 可持续发展; 均衡度; 用水效率; 水资源交易; 协同发展; 黄河流域

Sustainable development assessment of the Yellow River Basin and the coordinated development strategy

NING Yao¹, LIU Yali^{2,*}, DU Jianqing^{1,3}, YANG Yaqian⁴, WANG Yanfen^{2,3,5}

1 College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Yanshan Earth Critical Zone and Surface Fluxes Research Station, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

5 Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The Yellow River Basin is a crucially ecological barrier and economic belt in China, whose ecological protection and sustainable development are of great importance to the national development strategy. However, the low water-use

基金项目: 国家自然科学基金项目(42041005, 42001267); 中国科学院国际合作局国际大科学计划培育专项(121311KYSB20170004); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20050103)

收稿日期: 2020-12-29; 网络出版日期: 2021-10-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyali@ucas.ac.cn

efficiency and the improvable allocation scheme of water resources have impeded the holistic achievement of sustainable development in the Yellow River Basin. Here, this study adopted the evenness among SDGs and investigated the differences in the performance of sustainable development goals (SDGs), developing pathways, dependence on the water resources from the Yellow River, and water-use efficiency for agriculture and industry among nine provinces in the upper, middle and lower basins. The coordinated development strategy was then discussed based on the optimal utilization of water resources. Our results showed that: (1) from 2000 to 2015, the sustainable development score of the nine provinces of the Yellow River Basin had increased significantly. The middle and lower basins had a significantly better performance of SDGs than the upper basin only when neglecting the evenness among SDGs. (2) The deviation caused by ignoring the evenness among SDGs was also reflected at the provincial level. For example, Ningxia and Shanxi were previously considered to achieve well performances towards SDGs. However, their development was mainly reflected in a few SDGs, whereas many SDGs related to environmental protection had fallen back (e.g., SDG15). These results suggested that the performance of SDGs might be overestimated without considering the evenness among goals. (3) Regardless of the location along the Basin, the water consumption in many provinces was dependent on the Yellow River. However, the industrial and agricultural water consumption and water-use efficiency largely varied among these provinces. Generally, the water-use efficiency in the upper basin was relatively lower compared with that in the middle and lower basins. (4) The correlations between the water withdrawal amount and the 17 SDGs were different in the upper, middle, and lower basins. The amount of water withdrawal in the upper basin was irrelevant or negatively correlated with most of the SDGs, indicating that the limiting factor for its sustainable development was not the water resources; while the increase in water withdrawal could promote some SDGs related to economic and social development in the middle and lower basins. Overall, this study points out that it is important to strengthen the cooperation among the upper, middle, and lower basins through optimizing the industrial structure and water resources allocation, which could further promote the overall water-use efficiency and the ecological conservation of the whole basin, and eventually achieve the sustainable development of the whole Yellow River Basin.

Key Words: sustainable development; evenness; water-use efficiency; water resource trade; coordinated development; Yellow River Basin

黄河作为中国的母亲河,总长约 5464 km,流域面积约 75.2 万 km²,平均流量为 2571 m/s^[1],流经中国九个省(自治区)。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,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^[2]。然而,近年来由于水资源不合理的开发利用,造成了上游植被退化、中游水沙锐减、下游用水紧张、河口三角洲退缩等问题^[3]。

在气候变化和人类活动的干扰下,黄河流域可持续发展面临着巨大的挑战。已有研究指出黄河水资源紧缺的原因在于水体污染和水土流失问题,强调了水资源可持续利用的必要性^[4-5]。围绕这些问题,学者们开展了大量的研究。顾世杰等提出了水资源利用极化概念,用于定性分析黄河水资源利用是否存在超采^[6]。尹民等从城市尺度研究了黄河流域的生态环境需水量^[7]。张强等提出黄河干流站点水文变异与人类活动密切相关,特别是受用水量的增加及上游水利工程的调控^[8]。张金良系统分析了黄河流域水资源开发利用存在的突出困难和问题,提出了点线面结合五水同治的总体思路^[9]。在此基础上,学者们围绕黄河流域高质量发展分析了目前存在的问题和短板^[10-11],从水质、水量、用水效率出发剖析了黄河水资源可持续利用的路径选择^[12],并结合生态环境保护目标预测了不同情景下黄河的可持续发展状况^[13-14]。然而,已有研究往往忽略了黄河流域的整体性和连通性,即黄河九省在黄河水的联结相互影响、密切关联。此外,黄河流域上中下游对黄河水资源的依赖程度不同,其生态功能也有差异。上游主要是水源涵养功能^[15],中游是水土保持功能^[16-17],下游是排沙泄洪和湿地保育功能^[18]。目前,流域上中下游间在可持续发展状况、耗水量同可持续发

展目标间关系等方面的差异仍不甚清晰,缺乏基于黄河流域整体性的可持续发展评估,阻碍了黄河流域整体的生态保护和高质量发展。

联合国 2015 年提出了 17 项可持续发展目标^[19],涵盖了经济、环境、社会各个方面,评估可持续发展进程,明确发展的优势和不足,对指导政策制定具有重要意义。然而尽管大多数研究将这 17 个目标置于同等重要的位置^[20—22],目前对它们之间发展状况的均衡程度还缺乏系统研究。如果不考虑目标之间的均衡度,一个以牺牲环境为代价发展经济的地区,和一个经济、环境协调发展的地区,可能会得到类似的评估结果,然而前者的发展是不可持续的。基于此,Liu 等^[23]构建了均衡度这一指标体系,从 17 个目标的总体达成度和均衡度两个维度定义了可持续发展指数。本研究基于以上研究方法,分析了流域上中下游可持续发展状况间的差异,以水资源为纽带探索了黄河流域可持续发展策略。

1 研究区域概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,自西向东分别流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南及山东 9 个省(自治区),最后流入渤海(图 1)。黄河流域以内蒙古托克托县河口镇以上为上游,河口镇至河南荥阳市桃花峪为中游,自桃花峪以下至入海口为下游^[24]。黄河作为世界大河典型代表,它的气候和生态系统类型十分复杂^[25],跨越 3 个气候带,上中下游地理条件相差极大^[26]。同时它也是全球人类活动最为强烈的地区之一,居住着 4.2 亿人口(全国的 30%),年总产值达 23.9 万亿(全国的 26.5%)^[27]。黄河上中下游的经济发展也存在很大的差异,大部分的人口和国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)主要集中在中下游,上游地区经济落后且贫富差异大,全流域的经济发展差距呈逐渐扩大的趋势^[28]。

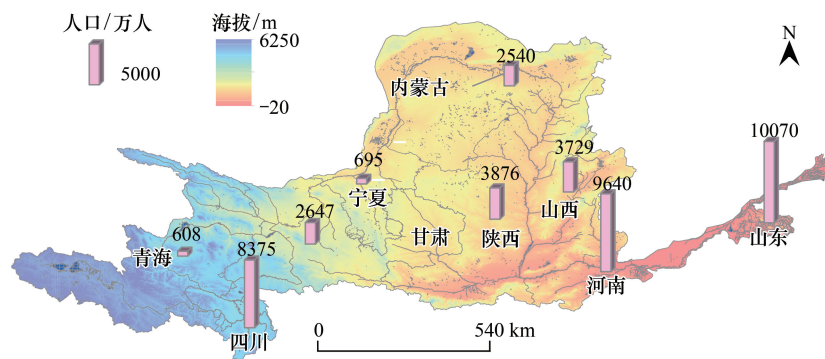


图 1 黄河流域图

Fig.1 Yellow River Basin map

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本研究收集了 2004—2017 年间黄河九省工农业用水量、工农业产值、粮食产量以及年末常住人口数据等数据,数据来源为国家统计局^[29]。2004—2017 年各省的黄河取水量数据来源于黄河水资源公报^[30]。黄河九省 2000、2005、2010、2015 的 17 个可持续发展目标(Sustainable development goals, SDGs)的评估数据来源于 Xu 等^[21],均衡度、可持续发展指数和有效发展指数引自 Liu 等^[23]。

2.2 相关指数计算方法

采用改进的扇形雷达图的方法计算了 17 个目标之间的均衡度(Evenness Score, ES)^[21, 23],其特征向量面积(S)和周长(L)的计算公式如下:

$$S_i = \sum_{j=1}^n S_j = \sum_{j=1}^n \pi f_j r_j^2, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$L_i = \sum_{j=1}^n L_j = 2 |r_{\max} - r_{\min}| + \sum_{j=1}^n 2\pi f_j r_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, n 代表 SDGs 的数量, 即 17 个; r_{\max} 和 r_{\min} 代表 17 个目标得分的最大值和最小值, r_j 代表第 j 个目标得分。 f_j 代表每个指标的权重, 本研究每个得分赋相同权重, 即 $1/17$ 。在此基础上计算 17 个目标的均衡度:

$$ES = S_i / [\pi (L_i / 2\pi)^2] = 4\pi S_i / L_i^2 \quad (3)$$

17 个目标的平均达成度 (Mean Index Score, MIS) 采用其算术平均值来计算^[21,23]。

基于平均达成度和均衡度两个维度, 重新构建了可持续发展指数 (Sustainable Development Score, SDS), 采用二者的几何平均值计算得出。

$$SDS = \sqrt{ES \times MIS} \quad (4)$$

采用发展路径和有效发展指数 (Effective development score, EDS) 来揭示各省的发展方向并量化一定时期内的可持续发展进展^[23]。发展路径是利用研究起始点和终点的可持续发展状况构建的向量, 可持续发展状况用相应时间点的目标平均达成度和均衡度表征, 最优发展路径是目标平均达成度和均衡度同时提高 (向量斜率 $k=1$)。在此基础上可将发展路径分为五类, 即相对理想、略欠发展、略不均衡、欠发展和不均衡状态 (图 2)。有效发展指数是指某一特定发展路径在最有发展路径上的投影长度 (图 2)。

2.3 统计方法与制图

使用 Microsoft Excel 软件对数据作整体统计分析。相关性分析使用 SPSS 26.0 软件完成。取水量和可持续发展目标之间的关系采用 Pearson 相关分析, 各省之间的工农业用水和单位工农业用水产值的差异采用单因素方差分析 (One Way ANOVA) 完成, 流域上中下游间可持续发展状况的差异采用双因素方差分析 (时间和流域位置)。所有图形使用 Origin 2018 软件绘制。

3 结果与分析

3.1 黄河流域上中下游可持续发展状况差异

单从目标平均达成度来看, 黄河中下游显著优于上游 ($P=0.03$, 图 3), 但是其均衡度略低于上游, 因此考虑均衡度之后, 中下游的可持续发展指数并没有显著高于上游 ($P=0.12$, 图 3)。利用有效发展指数来衡量 2000—2015 年上中下游的可持续发展进展, 发现上游平均值最高 (EDS=19.19), 下游次之 (EDS=15.90), 中游最低 (EDS=13.82)。总体来看, 上游地区可持续发展状况略差于中下游, 但其在 2000—2015 年间的发展相对较快。具体到各目标, 2015 年时 SDG17 (促进目标实现的伙伴关系)、SDG8 (体面工作和经济增长) 和 SDG15 (陆地生物) 的达成度较低, 其中 SDG15 自 2000—2015 年的进展近乎停滞。此外, SDG12 (负责任的消费和生产)、SDG5 (性别平等) 和 SDG13 (气候行动) 的达成度在这 15 年间也停滞不前, 甚至发生了后退 (图 4), 这些目标是黄河流域实现可持续发展的瓶颈。具体到各个

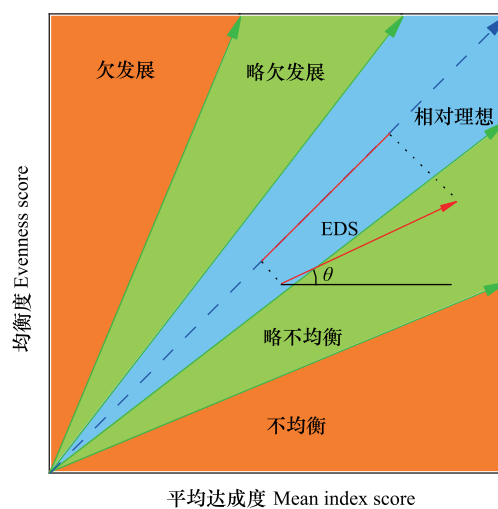


图 2 可持续发展路径概述图^[23]

Fig.2 Sketch presenting the definition of the developing pathway and the effective development score

EDS: 有效发展指数 Effective development score, 蓝色虚线为理想发展路径; 研究期间黄河九省的目标平均达成度和均衡度均未退步, θ 都是处于 $0-90^\circ$ 的区间范围, 为了进一步明确各省的发展路径, 以理想路径为中心的 90° 空间划分为两个 45° , 两端分别为不均衡 ($0^\circ < \theta < 22.5^\circ$) 和欠发展 ($67.5^\circ < \theta < 90^\circ$) 状态。中间部分进一步分为三个亚组, 即略不均衡 ($22.5^\circ < \theta < 37.5^\circ$), 相对理想 ($37.5^\circ < \theta < 52.5^\circ$), 略欠发展 ($52.5^\circ < \theta < 67.5^\circ$)

省份,上游五个省份中,宁夏发展路径不均衡,四川、内蒙古相对理想,青海、甘肃为略欠发展;中游的陕西处于相对理想的发展路径,山西为不均衡;下游的河南为相对理想的发展路径,山东为略欠发展(图 5、表 1)。其中,宁夏和山西发展最不均衡。2000—2015 年,宁夏和山西的目标平均达成度分别增加了 51.76% 和 25.99%,但目标间均衡度仅增加了 11.44% 和 3.63%,远低于 23.99% 的平均值。究其原因,宁夏的发展主要体现在 SDG1(无贫穷)和 SDG11(可持续城市和社区)两个目标上,而 SDG15 反而有所退步(图 4)。山西的发展则主要体现在 SDG10(减少不平等),而多个目标几乎没有进展,甚至出现了后退(图 4)。无论是否考虑均衡度,2000—2015 年间青海和山东的可持续发展进展均相对较差(图 5、表 2)。考虑均衡度后,山西的可持续发展进展最差(图 5、表 2)。

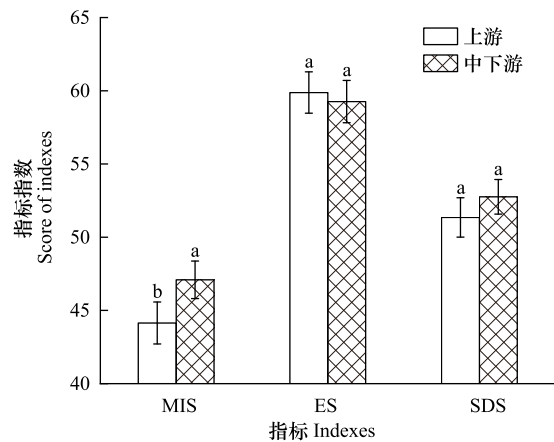


图 3 2000—2015 年黄河流域上游和中下游的可持续发展状况 (MIS, ES, SDS) 比较

Fig.3 Differences in MIS, ES, and SDS between upper, middle, and lower basins of the Yellow River from 2000 to 2015

MIS: 目标平均达成度 Mean index score; ES: 目标之间的均衡度 Evenness score; SDS: 可持续发展指数 Sustainable development score

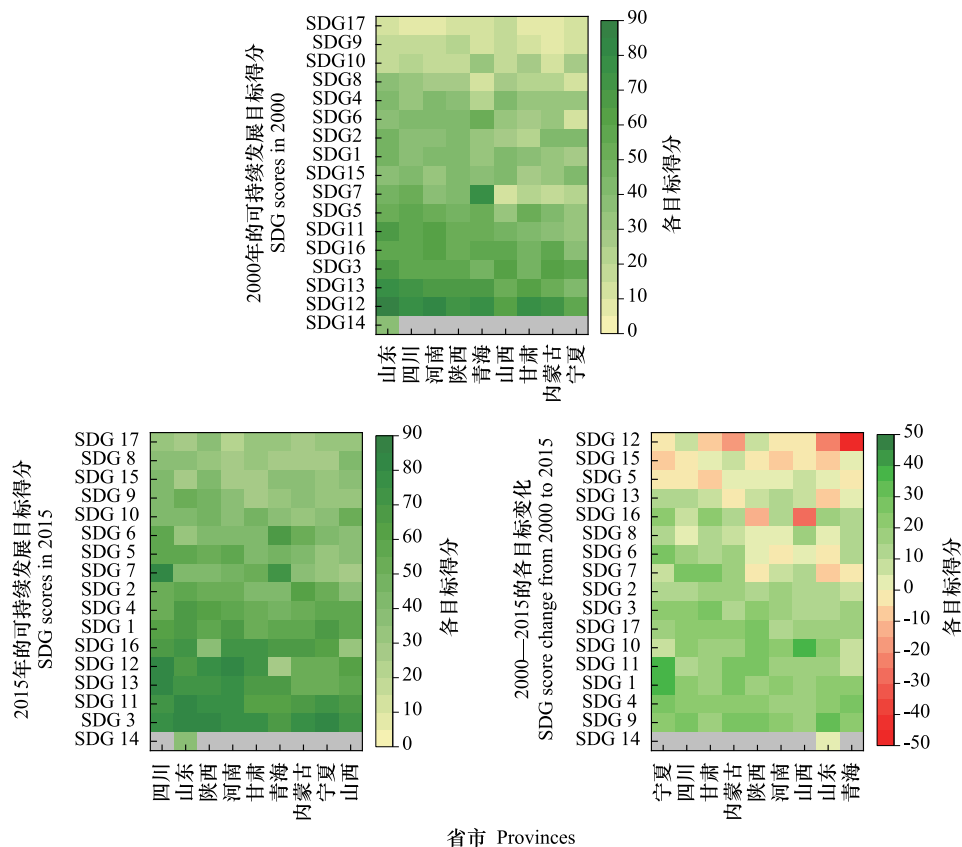


图 4 黄河九省各可持续发展目标在 2000 年和 2015 年的得分,以及从 2000—2015 年间的变化情况

Fig.4 Sustainable development goals (SDG) scores across provinces in 2000, 2015, and changes from 2000 to 2015

SDG1: 无贫穷; SDG2: 零饥饿; SDG3: 良好的健康与福祉; SDG4: 优质教育; SDG5: 性别平等; SDG6: 清洁饮水和卫生设施; SDG7: 经济适用的清洁能源; SDG8: 体面的工作和经济增长; SDG9: 产业、创新和基础设施; SDG10: 减少不平等; SDG11: 可持续城市和社区; SDG12: 负责任消费和生产; SDG13: 气候行动; SDG14: 水下生物; SDG15: 陆地生物; SDG16: 和平、正义与强大机构; SDG17: 促进目标实现的伙伴关系

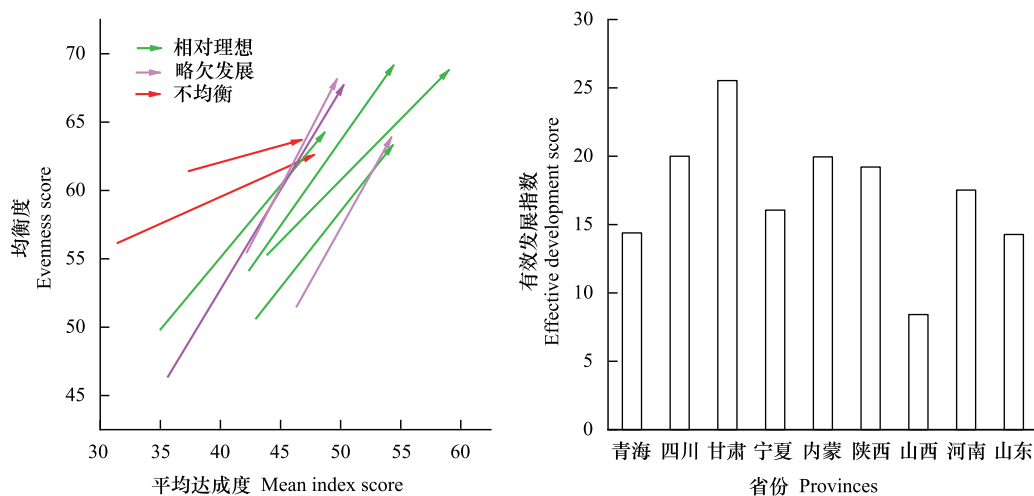
图5 2000年至2015年各省份的发展路径和有效发展指数(原始数据引自Liu等^[23])

Fig.5 Developing pathway and EDS of provinces from 2000 to 2015

表1 各省份的发展路径(原始数据引自Liu等^[23])

Table 1 Developing pathway of each province in the Yellow River Basin

黄河流域 Yellow River Basin	省份 Province	发展路径 Development pathway	倾斜角 θ
上游 Upstream	青海	略欠发展	59.26°
	四川	相对理想	41.93°
	甘肃	略欠发展	55.56°
	宁夏	不均衡	21.56°
	内蒙古	相对理想	46.67°
中游 Midstream	陕西	相对理想	51.35°
	山西	不均衡	12.99°
	河南	相对理想	48.94°
下游 Downstream	山东	略欠发展	57.91°

表2 2000年至2015年黄河各省份可持续发展目标的变化情况

Table 2 Change of each SDG score from 2000 to 2015 of each province in the Yellow River Basin

可持续发展目标 Sustainable development goals	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东
SDG1	71.08%	56.74%	49.30%	140.44%	85.99%	41.35%	37.56%	53.01%	46.57%
SDG2	28.08%	33.76%	71.25%	25.71%	39.73%	33.17%	41.26%	45.36%	26.43%
SDG3	41.49%	38.56%	64.05%	44.27%	24.79%	42.35%	21.23%	30.14%	18.17%
SDG4	134.93%	71.38%	72.35%	82.92%	73.36%	61.26%	46.81%	40.86%	53.65%
SDG5	-4.74%	-0.53%	-16.41%	-6.98%	5.90%	7.19%	17.91%	8.33%	3.51%
SDG6	27.29%	41.48%	42.81%	214.06%	56.27%	7.73%	2.92%	-0.94%	-2.79%
SDG7	-4.97%	51.28%	126.27%	30.86%	94.85%	-1.16%	78.23%	23.96%	-15.09%
SDG8	84.46%	14.20%	45.99%	89.73%	23.79%	15.15%	56.52%	2.91%	1.99%
SDG9	194.83%	169.28%	142.28%	223.53%	321.59%	115.32%	116.67%	119.21%	161.98%
SDG10	17.05%	99.07%	66.67%	34.18%	133.80%	157.54%	205.81%	155.84%	129.28%
SDG11	18.08%	23.47%	42.09%	118.60%	71.72%	53.37%	40.62%	27.08%	22.56%
SDG12	-63.41%	10.27%	-9.52%	-5.59%	-25.72%	6.89%	-1.93%	-1.09%	-24.80%
SDG13	3.25%	15.40%	12.67%	28.25%	-5.88%	8.41%	11.03%	21.01%	-6.91%
SDG14	—	—	—	—	—	—	—	—	3.06%
SDG15	0.00%	-0.93%	12.60%	-17.10%	25.90%	-0.46%	-10.65%	-17.29%	-18.89%
SDG16	24.14%	14.50%	45.10%	64.71%	21.16%	-27.36%	-46.93%	20.93%	27.78%
SDG17	158.68%	225.51%	370.77%	147.15%	353.45%	247.37%	93.89%	194.74%	138.79%

续表

可持续发展目标 Sustainable development goals	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东
MIS	18.02%	33.94%	41.20%	51.76%	38.97%	28.46%	25.99%	26.90%	16.81%
ES	23.03%	24.24%	46.21%	11.44%	29.10%	27.92%	3.63%	26.22%	24.16%
SDS	20.49%	28.98%	43.68%	30.04%	33.97%	28.21%	14.24%	26.58%	20.43%

SDG1:无贫穷 No poverty;SDG2:零饥饿 Zero hunger;SDG3:良好的健康与福祉 Good health and wellbeing;SDG4:优质教育 Quality education;SDG5:性别平等 Gender equality;SDG6:清洁饮水和卫生设施 Clean water and sanitation;SDG7:经济适用的清洁能源 Affordable and clean energy;SDG8:体面工作与经济增长 Decent work and economic growth;SDG9:产业、创新和基础设施 Industry, innovation and infrastructure;SDG10:减少不平等 Reduced inequalities;SDG11:可持续城市和社区 Sustainable cities and communities;SDG12:负责任消费和生产 Sustainable consumption and production;SDG13:气候行动 Climate action;SDG14:水下生物 Life under water;SDG15:陆地生物 Life on land;SDG16:和平、正义与强大机构 Institutions, good governance;SDG17:促进目标实现的伙伴关系 Partnerships for the goals;MIS:目标平均达成度 Mean index score;ES:目标之间的均衡度 Evenness score;SDS:可持续发展指数 Sustainable development score

3.2 九省对黄河水资源的依赖程度

黄河流域九省对黄河水的依赖程度有很大差异。其中,四川几乎不依赖黄河水;甘肃和河南对黄河水的依赖较小,在黄河取水量不足其总用水量的 30%。对黄河水依赖度较大的省份是宁夏、陕西和山西,在黄河取水量均占其总用水量的 50%以上。此外,绝大多数省份对黄河水的依赖程度逐年增加,宁夏、山西、河南和山东的增加趋势显著 ($P<0.05$);山东的增幅最大,从 2004 年到 2017 年增加了 65.7%;仅内蒙古对黄河水的依赖程度有所下降 ($P=0.04$) (图 6、表 3)。由于四川的用水几乎不依赖黄河水,因此下文不再将四川考虑在内。



图 6 黄河用水量占各省总用水量的比例/%
Fig.6 Proportion of water consumption from Yellow River to the total water consumption in each province

3.3 各省份工农业用水效率差异

3.3.1 农业用水效率

黄河流域 70% 以上的水资源都用于农业生产。自 2014 年以来,各省份单位农业用水产值均有显著增加 ($P<0.001$;表 4)。其中,增长最快的是山东,且截至 2017 年单位农业用水产值最高的也是山东,为 36.06 元/ m^3 ;最低的为宁夏,仅为 4.42 元/ m^3 ,二者相差了近 10 倍(图 7、表 4)。总体来看,上游地区总农业用水量最高,但各省份的单位农业用水产值显著低于中下游各省份(图 7)。从产粮角度来看,上游的粮食产率(每公顷粮食产量)普遍较低,而下游最高(图 8)。从 2000—2016 年,除青海外各省的粮食产率均有显著提高 ($P<0.001$),但陕西、宁夏和甘肃的增长速度较慢(图 8、表 5)。青海的粮食产率最低,且几乎没有任何增长(图 8、

表 5)。总体来看,上游地区农业用水量较高,但用水效率较低,而下游地区农业用水效率和粮食产率均最高。

表 3 各省黄河取水量占总用水量比例随时间变化的线性趋势分析

Table 3 The linear trend of each province's proportion of the water consumption from Yellow River to its total consumption over time							
省份 Province	斜率 Slope	调整后 R^2 Adjust R^2	P	省份 Province	斜率 Slope	调整后 R^2 Adjust R^2	P
青海	-0.235	0.02	0.282	陕西	0.178	0.104	0.139
四川	-0.001	0	0.473	山西	0.389	0.344	0.016
甘肃	0.064	0.044	0.23	河南	0.431	0.525	0.002
宁夏	0.526	0.503	0.003	山东	1.225	0.727	<0.001
内蒙古	-0.298	0.246	0.041				

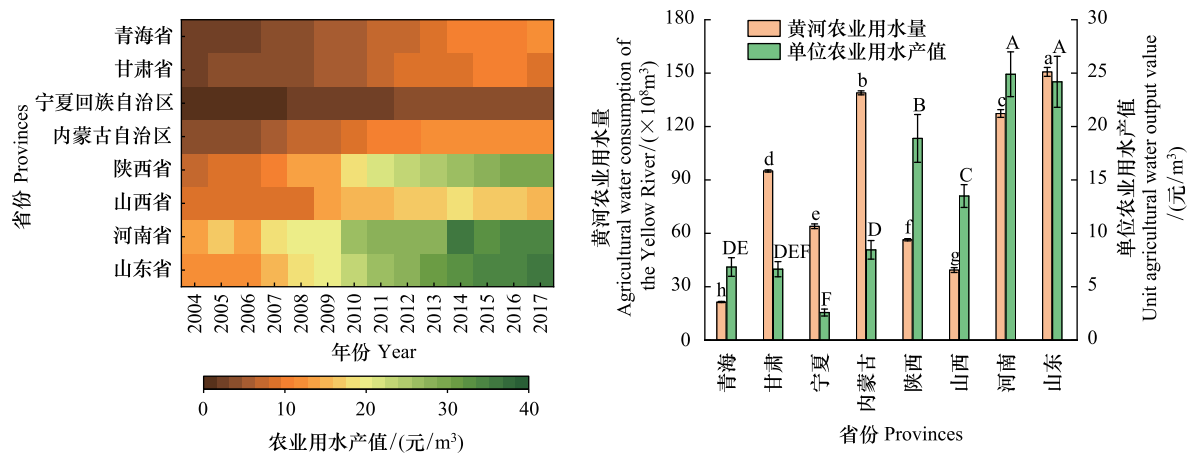


图 7 黄河各省的单位农业用水量和产值

Fig.7 Agricultural water consumption and output per unit of water consumption in different provinces in the Yellow River basin
不同的小写字母代表不同省份间农业用水量的显著差异 ($P<0.05$);不同的大写字母代表不同省份间单位农业用水产值的显著差异 ($P<0.05$)

表 4 各省单位农业用水产值随时间变化的线性趋势分析

Table 4 The linear trend of the output per unit agricultural water consumption in each province over time							
省份 Province	斜率 Slope	调整后 R^2 Adjust R^2	P	省份 Province	斜率 Slope	调整后 R^2 Adjust R^2	P
青海	0.769	0.972	<0.001	陕西	1.976	0.97	<0.001
甘肃	0.622	0.957	<0.001	山西	0.861	0.801	<0.001
宁夏	0.29	0.987	<0.001	河南	1.807	0.926	<0.001
内蒙古	0.752	0.932	<0.001	山东	2.119	0.983	<0.001

表 5 各省单位粮食产率随时间变化的线性趋势分析

Table 5 The linear trend of the grain yield in each province over time							
省份 Province	斜率 Slope	调整后 R^2 Adjust R^2	P	省份 Province	斜率 Slope	调整后 R^2 Adjust R^2	P
青海	0.004	0	0.414	陕西	0.043	0.914	<0.001
甘肃	0.068	0.92	<0.001	山西	0.105	0.908	<0.001
宁夏	0.053	0.86	<0.001	河南	0.092	0.892	<0.001
内蒙古	0.11	0.929	<0.001	山东	0.1	0.926	<0.001

3.3.2 工业用水效率

工业是黄河流域的重要产业,各省的工业生产总值均占总 GDP 的 40% 以上。2004—2017 年间所有省份的单位工业用水产值都显著增加 ($P<0.001$), 其中山东和陕西的增长速度最快(图 9、表 6)。山东的单位工业用水产值最高,而甘肃、宁夏、河南和青海最低(图 9)。整体来看,下游的工业用水量普遍大于中上游,上游的单位工业用水产值则普遍低于中下游(图 9)。值得注意的是,河南的工业用水量最高,但其单位工业用水产值相对较低(图 9)。

3.4 取水量与不同可持续发展目标间的关系

从全流域来看,取水量与 SDG2(零饥饿)均显著正相关(表 7)。除此之外,黄河上中下游的取水量同可持续发展目标达成度间的相关关系各异。在上游地区,许多可持续发展目标同取水量呈现出显著负相关关系,包括 SDG6(清洁饮水和卫生设施)这类与水资源密切相关的目标,除 SDG2 外没有同取水量呈现出显著正相关关系的目标,取水量的增加并未推动黄河上游的可持续发展(负相关和无显著关系居多)(表 7)。中游绝大多数目标与取水量呈正相关关系,且未发现显著负相关关系(表 7)。在下游地区,除了 SDG12 与取水量显著负相关外,多数目标均同取水量显著正相关(表 7)。

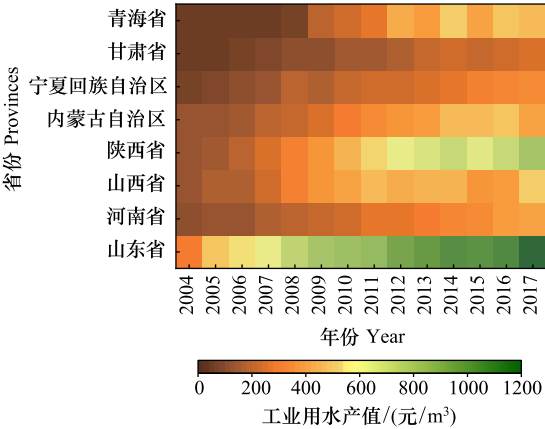


图 9 黄河各省的单位工业用水量和产值

Fig.9 Industrial water consumption and output per unit of water consumption in different provinces in the Yellow River basin

不同的小写字母代表不同省份间工业用水量有显著差异 ($P<0.05$); 不同的大写字母代表不同省份间单位工业用水产值有显著差异 ($P<0.05$)

表 6 各省单位工业用水产值随时间变化的线性趋势分析

Table 6 The linear trend of the output per unit industrial water consumption in each province over time

省份 Province	斜率 Slope	调整后 R^2 Adjust R^2	P	省份 Province	斜率 Slope	调整后 R^2 Adjust R^2	P
青海	42.288	0.894	<0.001	陕西	52.325	0.963	<0.001
甘肃	16.438	0.974	<0.001	山西	24.725	0.714	<0.001
宁夏	21.619	0.983	<0.001	河南	23.366	0.987	<0.001
内蒙古	30.65	0.925	<0.001	山东	55.718	0.948	<0.001

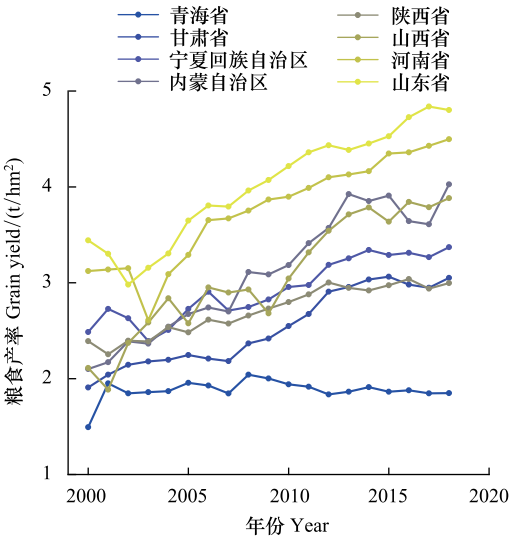


图 8 2000—2016 年黄河各省的粮食产率变化

Fig.8 Change of grain yield from 2000 to 2016 in different provinces in the Yellow River basin

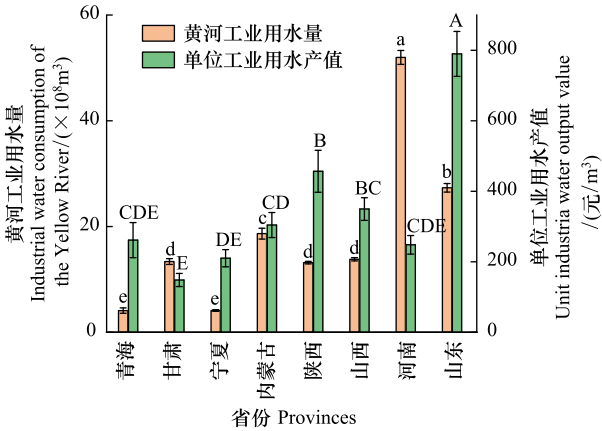


表 7 取水量与不同可持续发展目标间的相关性分析

Table 7 Correlation between each SDG and the water withdrawal

可持续发展目标 Sustainable development goals	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream	可持续发展目标 Sustainable development goals	上游 Upstream	中游 Midstream	下游 Downstream
SDG1	0.22	0.44	0.59	SDG10:	-0.56 **	0.47	0.66
SDG2:	0.74 **	0.94 **	0.76 *	SDG11:	0.30	0.50	0.72 *
SDG3:	0.42	0.54	0.81 *	SDG12:	0.16	0.80 *	-0.85 **
SDG4:	0.19	0.47	0.74 *	SDG13:	-0.69 **	0.87 **	0.12
SDG5:	-0.76 **	0.70	0.66	SDG14:			0.28
SDG6:	-0.59 **	0.91 **	-0.69	SDG15:	-0.12	0.52	-0.42
SDG7:	-0.79 **	0.83 *	0.34	SDG16:	-0.10	-0.10	0.49
SDG8:	0.30	-0.09	0.37	SDG17:	-0.29	0.52	0.62
SDG9:	0.02	0.86 **	0.77 *				

表中列出的是相关系数,其中 * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

4 讨论

4.1 考虑均衡度后黄河流域的可持续发展状况

从 2000—2015 年的 15 年间,黄河九省的可持续发展指数均有所提高,中下游地区的目标平均达成度显著高于上游,但是考虑均衡度之后,其可持续发展指数并不明显优于上游地区。从全流域来看,SDG12 以及 SDG15 普遍发生了不同程度的负增长,突出了落实流域绿色发展的重要性和紧迫性,特别是在中游和下游地区。在上游地区,虽然其可持续发展在这 15 年间进展普遍较快,但主要表现在同经济相关的部分目标,如 SDG1、SDG4(优质教育)和 SDG9(产业、创新和基础设施),而 SDG12 也发生了负增长,以青海最为严重。

在各省份层面上,忽略目标间均衡度也会高估一些省份的可持续发展状况。例如,山西和宁夏的发展路径极不均衡,不考虑目标间均衡度时严重高估了两者的可持续发展状况。山西受经济体制、开发机制、政策引导等多方面因素影响,其经济主要依靠矿产资源,形成了单一煤炭产业主导地方经济的畸形产业结构^[31],在一定程度上影响了生态环境保护,造成了发展路径不均衡的局面,其中 SDG12 和 SDG15 发生了倒退,阻碍了可持续发展目标的全面实现。宁夏在研究时期内目标平均达成度的进步最大,但主要是由于 SDG6(清洁饮水和卫生设施)和 SDG9 的大幅提升,但 SDG12 和 SDG15 同样发生了倒退。与之相反,四川在 2015 年的平均目标达成度较高,且发展路径也较为理想。近年来,四川积极调整产业结构,大力发展第三产业,注重生态环境保护,不断完善生态环境保护法制^[32],大力推动了绿色发展,具体表现在 SDG7(经济适用的清洁能源)、SDG12、SDG13(气候行动)等目标整体向好,推动了可持续发展目标的全面进步。四川的发展历程强调了通过优化产业结构促进负责任的消费和生产、强化环境保护工作推动陆生生物多样性保护对于全面实现可持续发展目标的重要性。

4.2 黄河流域的水资源压力

各省对黄河的依赖程度各异,四川的水资源主要来源于长江流域,几乎不依赖黄河。甘肃和河南对黄河水的依赖程度也较低,甘肃取水主要来自于西北诸河,如疏勒河、黑河、石羊河、苏干湖等^[33],河南则主要来自于淮河流域^[34]。总体来看,宁夏、陕西和山西对黄河水的依赖程度最高,青海和内蒙古次之。其中,陕西和山西在黄河的取水量均占其总用水量的 70% 左右,且近年来增加的用水量几乎全部来自于黄河^[30],缺少外源补给,增加了水资源压力。此外,山东总用水量稳定保持在 210 亿 m^3 左右^[30],但其在黄河的取水量逐渐增加,对黄河水资源的依赖程度增长最快。总体来看,黄河流域上中下游均有对黄河水资源较为依赖的省份,这些省份间产业结构、用水效率等不尽相同。例如,上游地区的工农业用水效率普遍较低,这与中下游地区工农业用水效率普遍较高且取水量增加能够促进许多可持续发展目标实现的现状形成了鲜明的对比。此外,即使是在中下游地区,各省份间也存在一定的差异。例如,尽管河南和山东同样拥有较高的农业用水效率,河南的工

业用水效率却远低于山东,但其工业用水量却为全流域最高,凸显出产业结构优化的重要性。研究结果也发现,上游地区可持续发展的限制因素并不是水资源,而可能是产业结构问题^[35];而在中下游地区,用水量的增加则能够促进一些同经济和社会发展相关的目标。这些结果表明,从黄河流域整体性出发,黄河水资源并没有得到高效的利用。“八七分水”作为黄河主要的分水方案已经实施 30 多年^[36],黄河流域的经济格局已经发生了巨大变化,水资源的供需矛盾日益加剧^[37],而水资源分配方案则并未与时俱进。提高水资源利用效率,缓解用水压力。因此,在制定合理生态补偿制度的前提下,上、中、下游间围绕水资源的协作和交易有望提高流域整体的水资源利用效率,缓解用水压力,推动黄河流域可持续发展。

4.3 基于水资源的协同发展策略

协同发展的核心原则是提高黄河流域整体的水资源利用效率,因在考虑地理地带性和垂直分异性的基础上,在保障粮食安全、生活和生态用水基本需求的前提下,在综合考虑生态补偿成本后,通过制定合理可行的水资源交易标准,引导低用水效率地区与高用水效率地区开展水交易,从而提高流域整体的水资源利用效率,实现生态保护和经济发展的双赢局面。在操作过程中,可在国家相关部门的统筹协调下,由相关省份协商落实。

具体来讲,在上游地区,农业用水是水资源的主要消耗方式,但其农业用水效率较低。因此,其在保障基本粮食安全的前提下,上游省份可以适度减少农业用水量,以“八七分水”为基础,将结余的水资源同中下游用水效率较高的省份开展交易,获取合理的生态补偿,并将其部分用于生态保护与恢复工作中,提高上游地区的水源涵养能力,保障黄河流域水资源稳定,形成正反馈效应,呼应黄河上游作为水源涵养地和生态安全屏障区的国家定位^[38-40]。对于下游地区来讲,河南和山东是我国重要的粮食生产核心区和经济区^[41-42],它们的单位农业用水产值最高,山东的单位工业用水产值也显著高于其它省份,中上游地区潜在的可供交易的水资源能够在这里发挥最大化的经济效益。同时,这部分水资源产生的碳足迹也可参照水资源的生态补偿标准在流域尺度上分摊,在促进下游经济增长的同时缓解其可能面临的低碳发展问题。

在操作层面上,水资源分配部分依赖于水库调控。黄河流域的水库同时兼具调沙功能,且水沙调控方式和排沙时间各异。例如,三门峡水库为“蓄清排浑”的运行方式,而小浪底水库则以“调水调沙”的方式运行^[43]。因此,在实施水资源分配时要特别注意不同水库的运行方式,保障水库的调沙功能。此外,分水方案的改变可能会影响现有河道的流量及流域环境,带来一些生态环境问题,如水质变化和水生生物栖息地改变等^[44-46],故而在实施过程中针对实际情况开展生态环境影响评价,厘定各个流域的最低生态需水量,避免造成生态环境的破坏。

总体来讲,在用水效率较低的地区提倡以保障基本生活需求(如粮食、饮用水、生活用水等^[47])和生态用水需求为目标的用水策略,在用水效率较高的地区最大化水资源的经济效益,并将部分制约绿色发展的因素(如碳排放、生态补偿成本等)在流域尺度上合理分摊,有望推动黄河流域整体的可持续发展。需要注意的是,围绕水资源的生态补偿,不能局限于财政补贴,还应包括提供技术援助、就业岗位等,要“授之于渔”而不是“授之于鱼”,从根本上推动落后地区的产业转型,才能保障黄河流域的可持续发展。

5 结论

总体来看,2000—2015 年黄河九省的可持续发展均取得了一定的进步,但是和绿色发展相关的一些目标普遍停滞不前甚至有所退步。在流域上、中、下游产业结构、用水效率、发展定位等均不相同的背景下,本文探讨了以最大化流域整体水资源利用效率为目标时,各省份间围绕水资源的协同发展策略,为黄河流域整体的生态保护和高质量发展提供了新的思路,也为其它大河流域的可持续发展提供了借鉴经验。

参考文献(References):

- [1] 王馨凤. 中华七大大水系. 今日国土, 2008, (3): 26-27.
- [2] 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.
- [3] 沈彦俊. 黄河流域生态环境保护与水资源可持续利用. 民主与科学, 2018, (6): 16-19.
- [4] 崔兆东. 黄河水资源可持续利用探讨. 水资源开发与管理, 2015, (2): 33-34, 43-43.
- [5] 毕栋, 张冬, 刘安国. 基于可持续发展的黄河水资源利用研究. 科技视界, 2017, (19): 182-182, 197-197.
- [6] Gu S J, Lu C X, Qiu J G. Quantifying the degree of water resource utilization polarization; a case study of the yellow river basin. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(1): 21-28.
- [7] 尹民, 崔保山, 杨志峰. 黄河流域城市生态环境需水量案例研究. 生态学报, 2005, 25(3): 397-403.
- [8] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 江涛. 水文变异下的黄河流域生态流量. 生态学报, 2011, 31(17): 4826-4834.
- [9] 张金良. 黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考. 人民黄河, 2020, 42(4): 1-6.
- [10] 郭哈. 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.
- [11] 赵钟楠, 姜大川, 李原园, 袁勇, 黄火键, 刘震, 李慧. 流域层面水利高质量发展的战略思路——以黄河流域为例. 水利规划与设计, 2020; 1-4. [2020-06-12]. <https://nxgp.cnki.net/kcms/detail?v=3uoqIhG8C46NmWw7YpEsKHTPvOGrU0OqX1coEOzL8AGvPNPgiEu7SX61KvH6tjPPI5munI2k7jp6tc9N4nMx65L3tZ8FJeLQ&uniplatform=NZKPT>.
- [12] 赵莺燕, 于法稳. 黄河流域水资源可持续利用: 核心、路径及对策. 中国特色社会主义研究, 2020, (1): 52-62.
- [13] 刘家旗, 茹少峰. 基于生态足迹理论的黄河流域可持续发展研究. 改革, 2020, (9): 139-148.
- [14] 刘建华, 黄亮朝, 左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展协同推进准则及量化研究. 人民黄河, 2020, 42(9): 26-33.
- [15] 郭婧, 张骞, 宋明华, 师燕, 周秉荣, 王文颖, 李以康, 赵新全, 周华坤. 黄河上游草地生态现状及功能提升技术. 草地学报, 2020, 28(5): 1173-1184.
- [16] 信忠保, 许炯心, 余新晓. 近 50 年黄土高原水土流失的时空变化. 生态学报, 2009, 29(3): 1129-1139.
- [17] 宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展. 生态学报, 2020, 40(1): 2-9.
- [18] 邵学军, 王光谦. 水资源开发对黄河下游河道环境生态功能的影响分析. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(6): 29-32.
- [19] United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Division for Sustainable Development Goals; New York, NY, USA. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- [20] Schmidt-Traub G, Kroll C, Teksoz K, Durand-Delacre D, Sachs J D. National baselines for the sustainable development goals assessed in the SDG index and dashboards. *Nature Geoscience*, 2017, 10(8): 547-555.
- [21] Xu Z C, Chau S N, Chen X Z, Zhang J, Li Y J, Dietz T, Wang J Y, Winkler J A, Fan F, Huang B R, Li S X, Wu S H, Herzberger A, Tang Y, Hong D Q, Li Y K, Liu J G. Assessing progress towards sustainable development over space and time. *Nature*, 2020, 577(7788): 74-78.
- [22] Sachs J D, Kroll C, Schmidt-Traub G, Lafortune G, Fuller G. SDG Index and Dashboards Report 2018. New York: Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN), 2018.
- [23] Liu Y L, Du J Q, Wang Y F, Cui X Y, Dong J C, Hao Y B, Xue K, Duan H B, Xia A Q, Hu Y, Dong Z, Wu B F, Zhao X Q, Fu B J. Evenness is important in assessing progress towards sustainable development goals. *National Science Review*, DOI:10.1093/nsr/nwaa238.
- [24] 陈效国. 黄河治理开发综述. 科学对社会的影响, 2001, (4): 22-25.
- [25] 孙强. 山西河曲黄河阶地研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [26] 郭云, 梁晨, 李晓文. 基于系统保护规划的黄河流域湿地优先保护格局. 应用生态学报, 2018, 29(9): 3024-3032.
- [27] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 中国水利, 2019(20): 1-3.
- [28] 宋炎炎. 基于栅格化的黄河流域经济发展差异研究[D]. 开封: 河南大学, 2018.
- [29] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2014-2017.
- [30] 黄河水利委员会. 黄河水资源公报. 郑州: 黄河水利委员会, 2004—2017.
- [31] 光文亮. 山西资源型经济转型发展的路径研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2015.
- [32] 郭洪兴. 四川生态环境质量持续改善 生态文明建设取得明显成效. 人民网. (2019-09-09). <http://m.people.cn/n4/2019/0909/c1439-13174631.html>
- [33] 甘肃省水利厅. 甘肃省水资源公报. 兰州: 甘肃省水利厅, 2004—2017.
- [34] 河南省水利厅. 河南省水资源公报. 郑州: 河南省水利厅, 2004—2017.
- [35] 李珏. 宁夏产业结构优化研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [36] 国务院办公厅. 国务院办公厅转发国家计委和水电部关于黄河可供水量分配方案报告的通知. 北京: 国务院办公厅, 1987.
- [37] 杨柠, 李森, 刘汗, 马毅鹏. 优化调整黄河“八七”分水方案的初步思考. 水利发展研究, 2020, 20(10): 102-104.
- [38] 杨得瑞. 明确两个定位 做好三项工作 推动青海生态文明建设. 水利发展研究, 2015, 15(7): 1-3, 8.
- [39] 白刘黎. 甘肃: 中国的生态安全屏障——如何打造这条生态安全屏障. 环境教育, 2014, (11): 37-40.
- [40] 王玉华, 高学磊, 白力军, 祁瑜, 布仁图雅. 内蒙古北方生态安全屏障建设研究. 环境与发展, 2019, 31(09): 202-205.
- [41] 杨韫. 以党的十九大精神为指引 引领新时代人才研究工作. 人才资源开发, 2017, (23): 8-9.
- [42] 吉喆, 苏云峰. 和谐发展 经典山东. 财经界, 2008, (15): 70-75.
- [43] 胡春宏. 从三门峡到三峡我国工程泥沙学科的发展与思考. 泥沙研究, 2019, 44(2): 1-10.
- [44] 王华, 李怀恩, 王莉. 泮河水质与流量之间的关系分析. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 83-88.
- [45] 黄月群, 蔡德所, 杨培思, 陈俊华. 漓江枯水期流量变化对鱼类栖息地的影响模拟. 生态科学, 2018, 37(2): 147-152.
- [46] Liu Y L, Du J Q, Hu P P, Ma M Z, Hu D. Microtopographic modification conserves urban wetland water quality by increasing the dissolved oxygen in the wet season. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 87: 71-81.
- [47] Fu B J, Wang S, Zhang J Z, Hou Z Q, Li J H. Unravelling the complexity in achieving the 17 sustainable-development goals. *National Science Review*, 2019, 6(3): 386-388.