

黄河流域水土保持综合治理空间均衡性分析

姚文艺^{1,2}, 焦鹏^{1,2}

(1.水利部黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 400003; 2.黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要: 黄河流域具有多类别的泥沙来源区, 水沙异源特性突出, 研究水土保持综合治理空间均衡性, 对于优化水土保持空间布局 and 有效持续减少入黄泥沙极为必要。基于黄河泥沙来源区特征和水土保持综合治理现状分析, 利用统计学理论与方法, 研究水土保持综合治理空间均衡性的概念、评价原理和评价方法, 并对治理现状的均衡性进行评价。结果表明: (1) 与流域水土流失强度空间分异性相对应、且在一定程度上能够有效控制侵蚀产沙强度的治理是空间治理均衡性的基本体现, 其治理程度可以利用治理效应定量反映; (2) 不同治理程度的减沙作用不同的, 通过分析全流域系统内不同分区治理措施减沙作用度的差异, 可以判识治理的空间均衡性; (3) 治理空间均衡性的评价内容主要包括划分评价流域分区、计算水土保持措施减沙作用度和空间治理均衡系数判识弱治理区; (4) 目前黄河流域空间治理是不均衡的, 兰州—头道拐片区、头道拐—龙门区间陕西北片的水土保持措施减沙作用度、空间治理均衡系数都很低, 属于典型的弱治理区。提出的水土保持综合治理空间均衡性评价方法可定量识别弱治理区, 为优化水土保持发展格局提供新的技术方法。

关键词: 空间均衡性; 治理均衡系数; 措施作用度; 水土保持综合治理; 黄河流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)01-0001-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.01.001

Spatial Equilibrium Analysis of Comprehensive Control of Soil and Water Conservation in the Yellow River Basin

YAO Wenyi^{1,2}, JIAO Peng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation on Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 400003; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 400003)

Abstract: The Yellow River Basin has a variety of sediment source areas, and the characteristics of water and sediment sources are prominent. Therefore, it is extremely necessary to study the Spatial equilibrium analysis of comprehensive control of soil and water conservation to optimize the spatial layout of soil and water conservation and to effectively and continuously reduce the sediment entering the Yellow River. Based on the analysis of the characteristics of the sediment source areas and the current situation of comprehensive control of soil and water conservation, we used statistical theory and methods to study the concept, principle and evaluation method of the spatial equilibrium of comprehensive control of the Yellow River soil and water conservation, and evaluated the equilibrium of control status. The results show that: (1) The spatial equilibrium of comprehensive control of soil and water conservation in the watershed refers to the control measures that corresponds to the spatial heterogeneity of soil erosion intensity and can effectively control the erosion and sediment yield intensity to a certain extent, and the degree of the control can be quantified by the effect; (2) The sediment reduction effects of different degrees of control are different, and the spatial equilibrium of control in the whole basin system can be identified by the differences in the degree of sediment reduction effect of different zoning control measures; (3) The evaluation method of spatial equilibrium of control is proposed, and the method mainly includes evaluation of watershed zoning, calculation of the degree of sediment reduction effect of soil and water conservation measures and spatial equilibrium coefficient of comprehensive control, and identification of weakly controlled areas; (4) At present, the spatial control of the Yellow River Basin is uneven, and the degree of sediment reduction effect of soil and water conservation measures and the spatial control equilibrium coefficient are very low in the Lanzhou-Toudaoquan area and the northern part of Shaanxi Province, which are typical weak control areas. The proposed method for evaluating

收稿日期: 2022-10-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(U2243210, 42041006); 内蒙古自治区水利科技专项(NSK202102)

第一作者: 姚文艺(1957—), 男, 教授级高工, 主要从事水土保持研究。E-mail: 964144518@qq.com

the spatial equilibrium of comprehensive control of soil and water conservation can quantitatively identify weakly controlled areas and provide a new technical method for optimizing the development pattern of soil and water conservation.

Keywords: spatial equilibrium; control equilibrium coefficient; measure action degree; soil and water conservation comprehensive control; Yellow River Basin

黄河流域水土保持综合治理取得了植被覆盖度明显提高、水土流失面积与强度“双下降”、黄河泥沙大幅减少、生态环境明显改善的显著成效^[1-2]。然而,从黄河流域整体系统来看,还存在着治理空间不均衡、人工生态系统质量和稳定性差等突出问题,是对持续、稳定减沙产生不利影响的重要因素。因此,分析黄河流域水土保持综合治理空间均衡性,判识“弱治理区”,对于提高流域治理的整体效能、促进水土保持高质量发展具有重要意义。

均衡原本是物理学中的一个重要概念,后来随着经济学、地理学等学科的发展,逐渐为其他学科所关注^[3]。1874 年 Walras^[4]最早从经济学的角度提出了一般均衡理论(general equilibrium theory),后来在其基础上发展了空间均衡的概念,并在经济、法律、人文地理、生态环境等多个学科中被引用^[5],而在不同学科中的空间均衡含义却并不完全相同^[6]。随着水土保持学科的发展,空间均衡问题也日益引起关注^[7]。而从目前成果来看,对水土保持综合治理空间均衡问题的研究大多关注于水土保持措施空间布局的优化问题。所谓优化空间布局,一般是以投入成本最小化、生态效益最大化,以及适宜度最大化作为空间布局目标,进而找到生态效益和空间分布适宜度最大化的水土保持措施空间优化配置方案^[8-9],或者通过设定水土保持措施类型、约束条件和土地适宜性参数,利用层次分析等方法评估预测其效益,从数量、时间和空间上提出水土保持措施的布局问题^[10-13]。有研究者^[14-15]利用聚类分析、人工评判等方法,通过对治理区域分区,根据坡度、土壤等因地制宜选取不同分区水土保持措施的配置方案;也有研究者^[16]利用小波分析方法,建立不同尺度下水土保持措施关键性影响因子在不同规模和作用区间的回归模型,进而确定不同措施的适宜区域和空间布局;还有通过对不同空间配置案例的效应分析,评估其合理性,提出空间适宜的布局方案^[17-18]。近年来水土保持措施在调控流域水资源配置中的作用已受到重视,从调控和优化配置水资源的角度优化水土保持措施空间配置的问题也被提了出来^[19]。傅伯杰^[20]强调,国土空间生态修复要注重协调布局 and 系统治理。谢永生等^[21]认为,水土流失治理措施配置模式具有层次性、阶段性和适宜性特点,选取治理模式应考虑各个层次模式的适宜性。因此,治理空间均衡性并不仅是措施配置或

布局的问题,应当是在流域整体系统内的不同分区上,所配置的措施体系在一定衡量比尺下的作用效应是否达到一致、协调的问题。而目前关于水土保持综合治理空间均衡性的基本概念、评价原理与方法仍是研究的薄弱环节,亟待对黄河流域泥沙主要来源区整体系统治理的空间均衡性问题开展研究。

为此,本文在分析黄河流域水沙来源分区及治理现状的基础上,基于水土保持的科学含义,从有效、可持续防治水土流失、减少入黄泥沙的角度,探讨水土保持综合治理空间均衡性概念,研究空间均衡性判识原理与方法,并对黄河流域的水土保持综合治理空间均衡性进行评价,为黄河流域水土保持与生态建设提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

水沙数据统计时段为 1919—2020 年,摘自《中华人民共和国水文年鉴》中历年的《黄河流域水文资料》卷,统计的水文站包括兰州、头道拐、龙门、潼关等,均为国家基本测站,观测系列相对较长,资料精度高。实际上黄河干流大部分水文站所观测的时间起始于 20 世纪 50 年代,其前的资料系根据 1919 年建于黄河中游干流的陕县水文站观测资料进行推算的,黄河水利委员会编印了《1919—1951 年及 1991—1998 年黄河流域主要水文站实测水沙特征值统计》^[22]年鉴,据此统计 20 世纪 50 年代以前的水沙数据。

由于水土保持措施量统计来源不同,有一定的差异,因此对其统计也是一项综合分析的过程。根据治理空间均衡性分析目的,措施的统计时段为 2000—2020 年。主要根据 2011 年完成的第一次全国水利普查成果、黄河水利委员会有关水土保持管理部门提供的资料、遥感影像解译资料,以及黄河水利委员会编制的《黄河水沙变化研究(白皮书)》^[23]有关资料进行综合分析获得。利用遥感影像对典型年流域植被覆盖及土地利用进行解译,分别采用 1985 年、1996 年、2000 年、2010 年、2017 年的 Landsat TM 数据,并参考地形图、区域专题研究资料与图件等其他资料。采用中国科学院资源环境数据库中的 1:10 万土地利用分类系统划分景观类型,划分了 6 个 1 级类型,包括耕地景观、林地景观、草地景观、水域景观、农村景观和未利用土地景观。因为研究分区是按流域划分的,因此以流域为单元统计治理措施量。

1.2 研究区域

以黄河流域作为评价区域。考虑到自兰州以下河段泥沙来源逐渐增多,至潼关水文站控制断面,径流量、泥沙量已分别占到全河的 90%和近 100%,控制流域面积也占黄河流域面积的 91%;同时随着水土保持与生态治理的推进,与 20 世纪 70 年代以前人类活动较少的基准期相比,潼关以上的中游主要来沙区支流是泥沙减少最明显的地区,减沙量约占全流域减沙量的 90%。因此,潼关水文站断面对黄河流域的水沙情势变化具有较好代表性。据此,经综合考虑,选择兰州以下、潼关以上作为主要评价区域,即兰州—潼关区间。分析区间的流域面积为 50.18 km²,其中包括黄河多沙粗沙区、粗泥沙集中来源区等,主要有十大孔兑(蒙语:洪水沟)、皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河、佳芦河、无定河、延河、渭河、泾河等 37 条一级入黄支流。

1.3 分析方法

为统计空间均衡性相关指标,需要分析不同区域水土保持措施的减沙量。为此,采用多年来常用的水土保持分析法(简称“水保法”)[24],其减沙量的计算公式为:

$$\Delta W_s = \sum \Delta W_{si} = \sum \alpha_{si} f_i \quad (1)$$

式中:ΔW_s为各项水利水土保持措施的总减沙量(t);ΔW_{si}为第*i*项水土保持措施的减沙量(t);α_{si}为各单项水利水土保持措施减沙指标(t/km²);*f_i*为各单项措施面积(km²)。

单项水利水土保持措施减沙指标系由黄河流域不同地区水土保持径流试验小区的水土保持措施减水减沙观测资料统计分析确定。由公式(1)计算水利水土保持措施减沙量时,每个分区的减沙指标 α_{si} 来自参考文献[23],在参考文献[23]减沙指标的确定中,黄河水利委员会和相关单位并对其误差及精度进行了反复评价分析。

2 黄河流域水沙来源与治理现状

为评价水土保持综合治理空间均衡性,需要了解黄河流域泥沙来源分区及其特征,分析水土保持综合治理现状。现状分析水平年为 2020 年。

2.1 水沙来源

黄河水沙异源、时空分布不均是黄河水沙的主要特性之一。黄河流域位于北纬 32°02′00″—40°28′00″和东经 95°58′00″—116°45′00″,具有地形地貌、气候和土壤等空间分异性大的侵蚀环境,其地形地貌从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原 4 个地貌单元,崇山峻岭、黄土高原、黄土丘陵、草原沙漠等多地形分布,尤其是黄土高原千沟万壑、支离破碎;黄河流域大陆性气候特征突出,特别是黄河上中游属于干旱半干旱地区,日照充足蒸发能力强,气候干燥寒冷多风沙,

夏季降雨极为集中且年际变化大;土壤类型多样而又以黄土为主,黄土孔隙率大黏性低,可蚀性强,易于侵蚀。特殊的侵蚀环境造就黄河流域侵蚀类型多样和泥沙来源分异性突出的特征。

以潼关水文站为代表,据 1919—2020 年实测水沙系列资料统计,潼关实测年均径流量、输沙量分别为 360.80 亿 m³和 11.12 亿 t,平均含沙量为 30.82 kg/m³。黄河水量主要来自于头道拐以上的上游,实测年均水量为 226.77 亿 m³,占潼关水量的 62.86%,而年沙量仅有 1.10 亿 t,占潼关输沙量的 9.90%;泥沙主要来自中游地区,其中头道拐至潼关区间年水量仅约占全河(以花园口断面为代表)水量的 1/4,而年输沙量却占全河近 90%。根据黄河流域产沙空间分异特性,分为少沙区、多沙区、多沙粗沙区和粗泥沙集中来源区。兰州以上为黄河径流的主要来源区,属于少沙区;多沙区分布于河口镇—龙门区间支流及华县、河津、状头以上渭、汾、洛河等支流[25],其面积为 26.6 万 km²,而年均输沙量却达 14 亿 t,占输入黄河泥沙量的 87.5%;多沙粗沙区分布于河口镇—龙门区间 23 条支流和泾河上游(马连河、蒲河)部分地区、北洛河上游(刘家河断面以上)部分地区,其面积为 7.86 万 km²,占黄土高原地区总面积的 11.8%,而多年平均输沙量却达 11.82 亿 t,占输入黄河泥沙量的 73.9%,粒径>0.05 mm 的粗泥沙 3.19 亿 t,占粗泥沙输沙总量的 72.5%,强烈及以上土壤侵蚀占全区强度以上水土流失总面积的 35.65%;粗泥沙集中来源区产生的主要为粒径>0.05 mm 的粗泥沙,进入黄河下游后易于淤积而难于冲刷,对下游河道危害最大,主要分布于陕西省北片的皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河等支流和无定河、延河等 11 条支流,其面积 1.86 万 km²,占黄土高原地区水土流失面积的 4.27%,多年平均输入黄河泥沙 4.08 亿 t,强烈及以上土壤侵蚀占全区强度以上水土流失总面积的 9.26%,且常出现 100 kg/m³以上的高含沙水流,例如皇甫川洪水含沙量曾达到 1 570 kg/m³的历史记录,成为黄土高原地区强烈侵蚀的中心。

2.2 水土流失现状

2020 年黄河流域水土流失面积 26.27 万 km²[26],占黄河流域总面积 75.24 万 km²(不包括内流区)的 34.9%,其中水力侵蚀面积 19.14 万 km²,风力侵蚀面积 7.13 万 km²。黄土高原水土流失面积 23.42 万 km²,占黄河流域水土流失面积的 89.15%,其中强烈以上等级土壤侵蚀面积 3.09 万 km²,占 13.2%;侵蚀模数>5 000 t/(km²·a)强烈水蚀面积 1.88 万 km²,占 8.0%;侵蚀模数>8 000 t/(km²·a)极强烈水蚀面积 1.01 万 km²,占 4.3%;侵蚀模数>15 000 t/(km²·a)剧烈水蚀面积 0.36 万 km²,占 1.5%。

从 2021 年的统计来看,黄河流域仍然比长江、淮河、海河、珠江、松辽流域(片)及西南诸河流水土流失严重,水土流失面积占包括黄河流域在内的上述江河流域面积的 32.63%,其水土流失面积中 34%为中度及以上等级。尤其是黄河中游多沙粗沙区仍是全国水蚀面积占土地面积比例和高强度水蚀发生率最高的区域,水蚀面积占比达 53%,其中中度及以上等级占比有 62%。与 2011 年第一次全国水利普查结果相比,2021 年黄土高原水土流失面积减少 13%,较 2020 年

减少 1.4%。总体来说,黄土高原水土流失状况逐年好转,黄河实测输沙量减少趋势明显(表 1),例如,1986—2000 年头道拐、龙门、潼关的年均输沙量较 1919—1959 年分别减少 69.0%,49.9%,49.3%。以头道拐为例,自 20 世纪 80 年代中期以来,降幅非常明显,近 2 年虽然输沙量有所增加,但总体趋势仍处于多年来的最低水平(图 1)。不过,尽管输沙量明显减少,但从表 1 可以看出,水沙来源区的分布特征并没有发生变化,头道拐以下仍然是泥沙主要来源区。

表 1 潼关以上代表断面年均径流泥沙量

水文站	时段	径流量/亿 m ³			输沙量/亿 t		
		汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
头道拐	1919—1959 年	155.90	94.80	250.70	1.17	0.25	1.42
	1960—1985 年	147.10	108.30	255.40	1.12	0.29	1.41
	1986—2000 年	63.80	98.00	161.80	0.25	0.19	0.44
	2001—2020 年	84.60	104.60	189.20	0.33	0.21	0.54
龙 门	1919—1959 年	196.70	128.74	325.44	9.35	1.25	10.60
	1960—1985 年	173.12	134.18	307.31	7.50	0.99	8.49
	1986—2000 年	86.80	118.61	205.41	4.38	0.93	5.31
	2001—2020 年	95.10	114.27	209.37	1.29	0.24	1.53
潼 关	1919—1959 年	259.02	167.12	426.14	13.40	2.52	15.92
	1960—1985 年	230.35	172.44	402.78	10.13	1.95	12.08
	1986—2000 年	119.43	141.19	260.62	6.12	1.95	8.07
	2001—2020 年	126.85	133.99	263.30	1.87	0.54	2.76

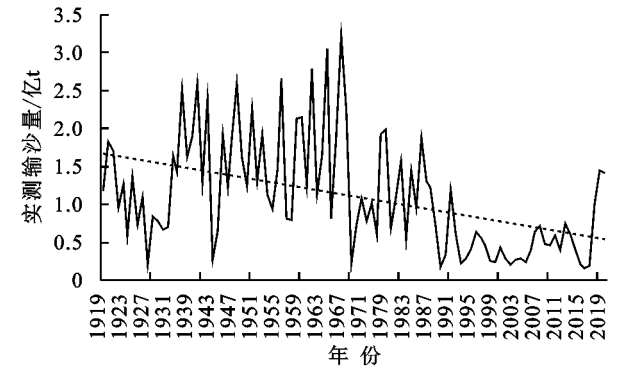


图 1 头道拐输沙量变化过程

2.3 水土保持综合治理现状

自 2011 年以来,黄河流域水土保持处于一个较快的发展时期,国家先后实施黄河上中游水土保持重点防治工程、退耕还林(草)工程、黄土高原水土保持淤地坝工程等一批生态建设项目,加快整个流域水土保持工作的全面开展。据统计^[26],2020 年水土保持累计治理面积 25.24 万 km²,其中梯田 608.02 万 hm²,造林 1 263.54 万 hm²,种草 234.30 万 hm²,封禁 418.35 万 hm²;累计建成淤地坝 5.81 万座,其中大型坝 5 858 座,中型淤地坝 1.2 万座,小型淤地坝 4.03 万座。黄河流域水土保持率从 1990 年的 41.49%和 1999 年的 46.33%,提高到 2020 年 66.94%,其中黄土高原地区水土保持率为 63.44%。

应注意的是,虽然从治理度或水土保持率等指标看,黄河流域水土流失得到一定规模的治理,但其治理却存在着空间不均衡的突出问题。

3 空间治理均衡性概念与评价方法

3.1 空间治理均衡性概念

流域空间治理均衡性并不是指在全流域实施均匀的治理,而是在全流域不同侵蚀产沙强度分区内,均实施与侵蚀产沙强度相对应,且不同分区均达到同一衡量标准下同一水平的减沙效应的治理,即在一定的侵蚀产沙区域内治理程度是与侵蚀产沙强度相匹配的。所谓相匹配,就是每个分区治理措施对单位面积单位侵蚀量(或产沙量)的减沙水平是相当的,如果在全流域每个侵蚀产沙分区都达到这样的治理要求,即实现了流域治理的空间均衡性或全流域均衡治理。

由前所述,黄河流域存在着少沙区、多沙区、多沙粗沙区和粗泥沙集中来源区等,而且即使在同一产沙类型区,不同支流的侵蚀产沙强度也存在差异,空间分异性非常突出。一般来说,侵蚀强度大的区域往往也是泥沙的主要来源地,这些地区的治理程度也应是最高,而且从理论上讲,治理程度越高其对流域减沙的贡献率也应越高;反之,侵蚀强度较低的地区,治理程度也应是相对较低的,因为与侵蚀产沙强度较高的地区相比,对于同样的治理程度,其对流域减沙的贡献率往往并不高。因此,开展均衡性治理对于费省效宏地减少全流域产沙量具有重要意义。

当然,在流域治理实践中往往可能达不到均衡性的要求,因而,存在治理程度无法达到一定减沙效应的区域,即弱治理区。当弱治理区的侵蚀强度仍较高

时,需要定量了解全流域内弱治理区的空间分布和弱治理的严重程度,以期提高弱治理区的治理程度,实现全流域均衡治理,使全流域水沙相对稳定地控制在满足治理目标要求的水平上。

流域治理均衡分为流域空间均衡和措施类型均衡,其中空间均衡是指按照流域侵蚀产沙强度空间分异性,在不同区域均开展与之侵蚀产沙强度相对应的治理,在全流域整体系统内考虑治理程度的合理分布;措施类型均衡性是指按照不同类型治理措施减水减沙功能和作用的不同,合理配置措施体系,实现措施体系总体减水减沙效益的最大化。本文侧重研究空间治理均衡性问题。

3.2 均衡性评价原理与方法

对于黄河这样具有复杂侵蚀环境的流域,不同区域均有不同的侵蚀产沙强度。尽管侵蚀产沙强度存在空间分异性,但在自然条件下,从统计学意义而言,流域系统泥沙来源分布及其产沙量却处于一个相对的稳定状态,而当流域内任意一个区域的侵蚀环境发生变化,如实施水土保持措施,侵蚀产沙强度就会相应改变,进而使该区域对河流泥沙的贡献率发生变化,或者说由此打破自然条件下流域产流产沙的空间分布状态。一般来说,治理程度越高对流域产沙环境的干扰作用越大,减沙的贡献率也越高,反之则越低。因此,在全流域系统内不同分区治理减沙作用程度的差异也反映治理的空间均衡性,当差异过大时,为不均衡,反之则是均衡的,这为开展空间均衡性评价奠定理论基础和方法原理。

要使流域总体减沙效果好且将产沙减少至一定的低水平,需要在不同产沙区开展均衡治理,否则,虽然通过对某些高产沙区的高强度治理可能在某一时期内使流域总体上达到某一减沙水平,但由于其他一些地区治理程度低,也难以保持其减沙水平的相对稳定,故空间治理的均衡性是实现全流域整体有效减沙的重要条件。当然,根据空间治理均衡性概念,流域空间上的治理程度应该存在一个相应的合理分布态势。为定量表征这样的分布态势,需要将不同侵蚀产沙区的治理程度或减沙效益统一到同一个判别标准,即同一衡量比尺上来,这个判别标准应当消除侵蚀产沙强度、产沙区面积、措施配置等不一致的问题,并将标准化后的减沙效益指标称之为治理措施作用度。由此可知,如果全流域各区域的治理都达到均衡,则应当有相同的作用度,在流域空间上不会存在作用度的分异性,或不存在作用度的“势差”面。为此,可以利用标准化后的治理减沙效益定量评价空间治理的均衡性。

根据以上原理,空间治理均衡性的评价可以表述的步骤有:

(1)划分流域评价分区,划分原则应充分考虑全流域水利水土保持措施实施情况、水沙来源分异特

性、干流水利工程规模及空间分布,以及其他人类活动等因素。

(2)利用“水文分析法(简称水文法)”或“水土保持分析法(简称水保法)”或其他方法分析流域治理的减水减沙效益。

(3)以自然条件下分区产沙量为基准,计算各分区不同类型治理措施相对减沙效益,即单位面积单位产沙量下的减沙量,消除不同分区产沙水平和措施类型单一化的影响,消除不同分区产生强度分异性的影响,并对减沙贡献率进行加权修正,得到修正后的治理措施减沙作用度。

(4)对各分区水土保持与生态治理措施减沙作用度进行归一化处理,计算空间治理均衡系数,即进行标准化,使不同分区治理效益统一在同一对比标准或衡量比尺上来,不同片区的均衡系数相差越小,说明流域整体系统空间治理相对越均衡,反之则越不均衡。

4 流域治理空间均衡性评价案例

4.1 评价区域分区

根据上述关于黄河流域水沙空间来源、治理现状和分区原则,将黄河潼关以上划分为 6 个分区(图 2),即兰州以上片区,包括河源区,为黄河径流的主要来源区,干流河段建有龙羊峡、刘家峡等大型水库;兰州至头道拐片区,流域面积 16.3 万 km^2 ,占黄河流域面积的 21.7%,其区间干流穿越腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠和毛乌素沙地,区间气候干旱且蒸发量大,支流较少,其中祖厉河和清水河等支流地形破碎,沟壑纵横,属于黄土丘陵沟壑区第三副区和第五副区,水土流失严重,在下河沿以下为沙漠宽谷河段,分布有十大孔兑等支流,属于典型的水蚀、风蚀、冻融复合侵蚀区,在该河段分布有黄河流域最大的宁蒙灌区;头龙区间(头道拐—龙门)陕西北片,包括皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河和佳芦河,5 条支流入黄控制站以上集水面积 17 481 km^2 ,是黄河大洪水的来源区和黄河粗泥沙的集中来源区,生态极度脆弱,风沙地貌和丘陵沟壑为该区基本地貌类型,也是黄河中游水土流失最难治理的地区;头龙区间陕西南片,主要包括无定河、清涧河、延河、云岩河(汾川河)和仕望川等 5 条支流,入黄支流控制站以上流域面积共计 42 824 km^2 ,以水力侵蚀为主,重力侵蚀和风力侵蚀也十分活跃,是黄河中游多沙粗沙区之一;头龙区间晋西片,系指山西省吕梁山脊以西、河龙区间以东的广大地区,包括浑河、偏关河、县川河、朱家川、岚漪河、蔚汾河、湫水河、三川河、屈产河、昕水河、清水河(州川河)等 11 条主要支流,入黄控制站以上流域面积共计 22 677 km^2 ,该片区大部分属于黄土丘陵沟壑区,另有部分缓坡风沙区及少量的土石山区,水土流失十分严重,年均侵蚀模数约 8 000~12 000 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;龙门至潼关片区,区间面积 18.46 万

km²,主要包括泾河、渭河、北洛河和汾河,是黄河洪水泥沙主要来源区之一,北洛河刘家河断面以上、泾河马连河断面以上是黄河中游多沙粗沙区,经常发生高含沙洪水,在汾河上游及干流左岸以及渭河北岸均是黄土区,水土流失比较严重。以上片区中头龙区间是黄河泥沙的主要来源区,其流域面积 11.2 万 km²,仅占潼关以上流域面积的 16.4%,但其年均入黄沙量占到潼关以上地区总输沙量的 58.6%。



图 2 黄河流域上中游生态治理形势评价分区

4.2 治理空间均衡性评价

通过估算不同片区各项水利水土保持措施减少入黄泥沙的贡献率和措施作用度,进而评价治理均衡性,发现治理存在的薄弱区。

(1)计算治理措施减沙贡献率。由公式(1)计算每个分区的水土保持措施减沙量,进而计算单项水利水土保持措施减沙贡献率:

μ_i = (ΔW_{si} / ΔW_s) × 100% (2)

式中:μ_i为第 i 项水利水土保持措施的减沙贡献率(%);ΔW_{si}为第 i 项措施的减沙量(t);ΔW_s为各项水利水土保持措施的总减沙量(t)。

(2)消除片区产沙水平影响。为消除不同片区产沙水平的影响,以及避免措施过于单一而放大其减沙作用的问题,以该措施减沙量与该片区单位面积入黄输沙量(输沙模数)之比作为权重系数,对措施减沙贡献率进行修正,并将其称之为措施作用度,即:

δ_{ij} = (μ_{ij} ΔW_{sij} / W_{sj}) (3)

式中:δ_{ij}为第 j 片区第 i 类措施的作用度;μ_{ij}为第 j 片区第 i 类措施的减沙贡献率(%);W_{sj}为第 j 片区治理前的基准期输沙模数(黄土丘陵沟壑区可近似指产沙模数)(t);ΔW_{sij}为第 j 片区第 i 类措施的减沙量(t)。将各片区不同类型治理措施作用度求和,得到片区总作用度,即:

δ_j = Σδ_{ij} (4)

(3)归一化处理。为评价各片区治理程度差异,对每个片区的措施作用度 δ_j 进行归一化处理,即:

α = δ_j / Σδ_j (5)

由此可比较不同片区各项措施的减沙权重,能够反映各片区之间的空间治理均衡性,因此,可以将 α_j 称之为第 j 片区治理均衡系数,并据此评价全区域空间治理的均衡性。

按公式(2),计算各片区水利水土保持措施的减沙贡献率(表 2)。按公式(3)、公式(4),消除片区产沙水平和措施类型单一化的影响,对减沙贡献率进行加权修正,即得到修正后的各片区治理措施减沙作用度(表 2),作用度越大,说明该区治理的减沙效应越大。

表 2 各片区治理措施减沙贡献率、修正后作用度和均衡系数

片区	贡献率/%	修正后作用度	均衡系数
兰头片区	37.26	0.1037	0.0678
陕西北片	29.46	0.1035	0.0676
陕西南片	89.70	0.8006	0.5232
晋西片	50.01	0.2110	0.1379
龙潼片区	79.53	0.3114	0.2035

注:兰头片区指兰州—头道拐片区;龙潼片区指龙门—潼关片区;其他 3 片均指头龙区间片区。

对各片区水利水土保持措施减沙作用度进行归一化处理,得到空间治理均衡系数(表 2),不同片区的均衡系数相差越小,说明相对越均衡。由此可以比较出在 5 个研究区域内,各片区治理措施所起的作用大小或治理的空间均衡性。

由表 2 可知,5 个片区内的空间治理是相当不均衡的,兰州至头道拐片区、头龙区间陕西北片的减沙作用度、空间治理均衡系数都很低,而且两者的治理作用度、均衡系数非常接近,由此表明,这 2 个片区属于典型的弱治理区。虽然多年来国家、地方在这 2 个片区实施了多项治理工程,水土流失面积和侵蚀强度总体有所减少,但是相对单位面积、单位侵蚀量的治理措施减沙量或减沙水平较其他区域却很低,显然这 2 个片区应当作为今后重点治理的区域。加大这 2 个片区的治理力度,对于有效减少进入黄河的粗泥沙,整体改善黄河流域的生态环境,实现水土保持高质量发展十分必要。

5 讨论与合理性分析

评价结果表明,兰州至头道拐片区、头龙区间陕西北片是弱治理区,在这 2 个片区,多沙粗沙区和粗泥沙集中来源区叠加,水蚀、风蚀交错侵蚀广布,被称为“地球生态癌症”的砒砂岩区即位于其中,分布有西柳沟等十大孔兑、皇甫川、孤山川、窟野河、秃尾河和佳芦河等黄河一级支流,是最难治理的区域。2022 年 10 月颁布的《中华人民共和国黄河保护法》明确将砒砂岩区、多沙粗沙区、水蚀风蚀交错区确立为黄河流域的首要治理区,赋予了对其治理的法律地位;2021 年 10 月中共中央、国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》也把多沙粗沙区治理列为中游水土保持的重点区域。研究成果与国家层

面所确立的今后重点治理区一致,也佐证了研究成果将这 2 个片区评价为弱治理区的合理性。

根据近年监测分析^[26-27],侵蚀模数 $>5\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的地区都是黄土分布区和砒砂岩区,尤其是水蚀和风蚀交错区侵蚀最为强烈。侵蚀模数 $>10\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的地区多集中分布于皇甫川—延河区间的支流,以及马莲河上游、北洛河金佛坪以上流域,目前在砒砂岩部分区域的侵蚀模数仍高达 $10\,000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 以上。另外,在黄河多沙粗沙区,水土流失面积仍占多沙粗沙区面积 7.86 万 km^2 的 50% 以上;粗泥沙集中来源区水土流失面积仍占粗泥沙集中来源区面积 1.88 万 km^2 的 55% 。虽然 2021 年黄河流域生态环境状况持续向好,但是多沙粗沙区仍是高强度水蚀发生率最高的区域,其水蚀面积占区域土地面积高达 53% ,且 62% 为中度及以上等级、 27% 为强烈及以上等级,均为全国平均水平的 2.5 倍^[2]。

另据 1999—2000 年多沙粗沙区土壤侵蚀强度空间动态变化统计^[28],发生中度以上土壤侵蚀强度降级但未降到微度的部位,占总面积的 38.31% 。侵蚀强度未变化的面积占土壤侵蚀未减轻面积的 12.09% ;土壤侵蚀强度等级加剧的占比为 8.14% 。在土壤侵蚀强度等级加剧的区域中,非水土流失面积变为水土流失面积占比 2.42% ;水土流失加剧的面积占比 5.72% 。据分析^[29],近 10 年黄河中游土壤侵蚀模数降低 34.7% ,而多沙粗沙区仅降低 1.2% ,说明多沙粗沙区侵蚀模数仍然很高。

位于兰州至头道拐片区的十大孔兑,虽然先后实施多项治理工程,但目前的治理仍相当薄弱,水土保持措施配置单一化、零散化问题突出,植被覆盖度远低于黄土高原多数地区 60% 左右的效益,而且淤地坝工程建设不足,如截至 2018 年其保存的大中小淤地坝仅有 354 座,对十大孔兑的减沙贡献率只有 20% 左右,明显低于黄土高原淤地坝减沙 30% 左右的贡献率^[30]。

上述研究成果均表明,分布于兰州至头道拐片区、头龙区间陕西北片的砒砂岩区、多沙粗沙区的治理显然是薄弱的,相对黄土高原其他地区来说,存在着治理措施体系配置不甚合理、治理程度相对较低的突出问题,因此,尽管近年来输沙量明显降低,但侵蚀模数和侵蚀强度仍相对较高,进一步说明黄河流域水土保持综合治理的不均衡性。综合分析,提出的兰州至头道拐片区、头龙区间陕西北片是弱治理区的结果是合理的。

6 结论

(1)黄河泥沙具有空间来源分异性大的自然属性,需要注重水土保持综合治理的空间均衡性,以达到减沙的可持续性和减沙水平的稳定性。为此,在科学定义治理空间均衡的基础上,提出水土保持综合治理空间均衡性判别方法,该方法具有明确的物理基础,其原理反映黄河流域泥沙来源分异特征和水土保

持减沙规律,并通过案例分析佐证该方法评价结果的可靠性,其具有较强的应用能力,可定量准确判识水土保持综合治理的空间均衡性。

(2)黄河流域水土保持综合治理存在着空间不均衡的问题,其中兰州至头道拐片区、头龙区间陕西北片是潼关以上的弱治理区,需要作为今后加强治理的区域,以提高全流域整体系统的治理均衡性。

由于黄河侵蚀产沙规律和水土保持措施作用机理非常复杂,因此精准判识水土保持综合治理的空间均衡性是一个极具难度的科学问题。本文提出的空间均衡性评价方法属初步探索,仍需从空间均衡性和措施配置均衡性综合判识方面开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 李文学.黄河治理开发与保护 70 年效益分析[J].人民黄河,2016,38(10):1-6.
- [2] 水利部.2021 年全国水土流失动态监测显示我国水土流失状况持续向好,生态文明建设成效斐然[EB/OL].(2022-06-28)[2022-10-10].https://mp.weixin.qq.com/s/8o8Tv_3NjiEBeiRGQCcA-w.
- [3] 贾善铭.区域经济增长空间均衡研究述评[J].区域经济评论,2014(1):124-129.
- [4] Walras L. Elements d'economie politique pure Lausanne: L.Corbaz. Transl.By William Jaffe as elements of pure economics, Homewood, I 11; Richard D.Irwin[J].Metroeconomica,1954,6(3):136-139.
- [5] 陈雯.空间经济学研究的相关进展与评述[J].世界地理研究,2007,16(4):70-75.
- [6] 挂云帆.空间均衡理论[EB/OL].(2021-03-06)[2022-10-10].<https://www.guayunfan.com/lilun/82805.html>, /2022-10-10.
- [7] 姚文艺,刘国彬.新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策[J].水土保持通报,2020,40(5):333-340.
- [8] 徐伟铭,陆在宝,肖桂荣.基于遗传算法的水土保持措施空间优化配置[J].中国水土保持科学,2016,14(6):114-124.
- [9] 陆在宝.基于遗传算法的水土保持措施空间优化配置:以福建省长汀县为例[D].福州:福州大学,2018.
- [10] 许炯心,姚文艺,韩鹏,等.基于气候地貌植被耦合的黄河中游侵蚀过程[M].北京:科学出版社,2009.
- [11] 薛颀.浑善达克沙地植物生长适宜性精准空间分布研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [12] 张晓光,朝阳县下洼小流域水土保持措施空间配置[J].黑龙江水利科技,2020,48(7):143-146.
- [13] 陈亮.基于辽宁省坡耕地水土保持措施的空间配置研究[J].水资源开发与管理,2017(12):31-34.
- [14] 张海强,张满良,何秀红,等.甘肃黄河流域水土保持生态环境建设区域配置研究[J].现代农业科学 2009,16(3):144-146.
- [15] 张风香,刘培郎.基于生态安全的小流域水土保持措施空间配置研究:以灯台架小流域为例[J].水利规划与设计,2018(7):104-106.

量级并未随之降低。

(2)在旱季降水总量与降雨强度显著相关,且受土壤湿度与流域内储水量的影响,径流过程对事件前 10 天降水响应较为敏感;在雨季,地表径流的主要影响因素为降水总量和降水强度。

(3)流域内径流事件前期储水量对径流事件的特征影响具有阈值变化,在前 10 天降水量未达 5 mm 时,峰值流量对其响应敏感。

(4)流域内 $<5, 5\sim 10, 10\sim 20, >20$ mm 的降水量均与泉眼山水文站径流量呈现正相关,相关系数(R)分别为 0.010, 0.054, 0.300, 0.380, 其中 >20 mm 降水量与径流量变化趋势具有显著的相关性,其联系更加紧密。

参考文献:

- [1] Tarasova L, Basso S, Zink M, et al. Exploring controls on rainfall-runoff events: 1. Time series-based event separation and temporal dynamics of event runoff response in Germany [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10): 7711-7732.
- [2] Blume T, Zehe E, Bronstert A. Rainfall—runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation[J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2007, 52(5): 843-862.
- [3] 王晨杨, 闫铁柱, 翟丽梅, 等. 密云水库白河流域基流演变特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3181-3190.
- [4] 莫崇勋, 谢燕平, 班华珍, 等. 不同基流分割方法在澄碧河的适用性探讨[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 86-92.
- [5] Xie J X, Liu X M, Wang K W, et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583:

e124628.

- [6] 吴珍妮, 黄土区基流分割适宜性方法及基流特征分析[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [7] 亢小语, 张志强, 陈立欣, 等. 黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 563-572.
- [8] 王素艳, 李欣, 王璠, 等. 宁夏降水资源格局演变特征[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 733-746.
- [9] 包淑萍, 马云, 王生鑫, 等. 宁夏清水河流域水资源评价分析[J]. *宁夏农林科技*, 2015(3): 43-46, 50.
- [10] 孟祥仪. 基于 WASP 模型的宁夏清水河水水质预警研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [11] Sun J Q, Wang X J, Shahid S, et al. An optimized baseflow separation method for assessment of seasonal and spatial variability of baseflow and the driving factors [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(12): 1875-1896.
- [12] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 63-72.
- [14] 郑诗然, 胡琦, 和骅芸, 等. 1961—2020 年华北平原冬小麦-夏玉米生长季内光能资源时空变化特征[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(1): 26-37.
- [15] Sheng Y, Wang C Y. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series[J]. *Water Resources Management*, 2004, 18(3): 201-218.
- [16] Mei Y W, Anagnostou E N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 636-649.

(上接第 7 页)

- [16] 苏长芳. 基于多尺度影响因子的水土保持措施布局研究[J]. *水利技术监督*, 2020(1): 161-164, 268.
- [17] 和继军, 蔡强国, 方海燕, 等. 张家口地区水土保持措施空间配置效应评价[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 69-75.
- [18] 周毅, 魏天兴, 解建强, 等. 黄土高原不同林地类型水土保持效益分析[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 12-16, 21.
- [19] 何长高. 水土保持在综合调控流域水资源配置中的作用[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 91-102.
- [20] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.
- [21] 谢永生, 李占斌, 王继军, 等. 黄土高原水土流失治理模式的层次结构及其演变[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 211-214.
- [22] 水利部黄河水利委员会. 1919—1951 年及 1991—1998 年黄河流域主要水文站实测水沙特征值统计[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2001.
- [23] 黄河水利委员会. 黄河水沙变化研究[R]. 郑州: 黄河水

利委员会, 2015.

- [24] 张胜利, 于一鸣, 姚文艺. 水土保持减沙减沙效益计算方法[M]. 北京: 中国环境出版社, 1994: 106-145.
- [25] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996: 43-48.
- [26] 张兴军. 黄河流域水土流失面积和强度实现“双下降”[EB/OL]. (2022-01-30) [2022-10-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/30/content_5671409.htm.
- [27] 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. *人民黄河*, 2018, 40(6): 141-147.
- [28] 殷宝库, 苏鹏飞, 张建国, 等. 1985—2020 年黄河中游多沙粗沙区水土流失动态变化[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 123-126.
- [29] 李占斌. 黄河中游多沙粗沙区风水复合侵蚀协同治理技术与示范项目实施方案[R]. 西安: 西安理工大学, 2022: 3.
- [30] 陈正新. 黄河十大孔兑水土保持减沙效益评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2021: 236-237.