

· 调查与评价 ·

## “省公顷”下渭河干流甘肃段生态安全评价及预测

邵月花, 杨调调, 谈存峰\*

(甘肃农业大学财经学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**摸清流域生态需求和生态供给是流域生态治理和促进其高质量发展的基础。文中应用改进生态足迹法对2009—2018年渭河干流甘肃段生态足迹和生态承载力进行核算,并运用GM(1,1)模型对流域未来的生态供需趋势进行预测。结果显示,2009—2018年渭河干流甘肃段生态足迹和生态承载力呈波动下降趋势,生态足迹下降2.26%,下降趋势低于生态承载力的4.18%;生态赤字以每年0.58%的速率波动减小。如果继续当前的发展模式,那么预计到2028年,生态赤字较2018年降低16.27%,流域生态安全状况将得到缓解。

**关键词:**生态足迹;生态承载力;GM(1,1)模型;省公顷;渭河干流甘肃段

中图分类号:X171.1;F062.2

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2022)04-0032-06

## Ecological Security Evaluation and Prediction of Gansu Section of Weihe River Based on “Sub-national Hectares”

SHAO Yue-hua, YANG Diao-diao, TAN Cun-feng\*

(College of Finance and Economics, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** Understanding the ecological demand and ecological supply was the basis of watershed ecological governance and promoting its high-quality development. In this paper, the improved ecological footprint was applied to calculate the ecological footprint and ecological carrying capacity of Gansu section of Weihe River from 2009 to 2018, and GM(1,1) model was used to predict future ecological supply and demand trend of the watershed. The results showed that from 2009 to 2018, the ecological footprint and ecological carrying capacity of Gansu section of Weihe River presented a fluctuating downward trend. The ecological footprint decreased by 2.26%, which was lower than 4.18% of the ecological carrying capacity. The ecological deficit fluctuated down at a rate of 0.58% per year. If the current development model continued, by 2028, the ecological deficit was projected to be 16.27% lower than that in 2018, and the ecological security of the watershed would be alleviated.

**Key words:** Ecological footprint; Ecological carrying capacity; GM(1,1) model; Sub-national hectares; Gansu section of Weihe River

流域生态系统作为一个集自然-经济-社会为一体的复杂生态系统,在创造人与自然共生的主体自然空间和保证国家生态安全方面具有积极的正向作用。然而,随着经济的快速发展和城镇化水平的不断加快,流域生态环境受到越来越多的外部威胁,多数流域出现了不同程度的水土流失、水体污染、物种多样性下降和生态系统退化等问题<sup>[1]</sup>。因此,有必要对流域尺度的生态环境进行系统的核算与评估<sup>[2]</sup>,以缓解资源、经济、人口和环境之间的矛盾,进而维护流域生态安全,促进可持续发展。

近年来,随着数据的易获得性及研究方法的改进,生态足迹成为流域生态环境定量评价研究中运用最广泛的方法之一。1992年,Rees<sup>[3]</sup>首次提出生态足迹理论,将人类对自然资源及其生态系统服务的消耗与环境影响联系起来<sup>[4]</sup>,随后 Wackerna-

收稿日期:2021-06-30;修订日期:2022-05-06

基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(20JR10RA442)

作者简介:邵月花(1995—),女,甘肃榆中人,在读研究生,研究方向为流域生态保护。

\*通信作者:谈存峰 E-mail: 364600588@qq.com

gel 等<sup>[5]</sup>对其进行完善和推广,使之成为一种测度和衡量人类可持续发展状况的有效工具<sup>[6]</sup>。2000 年,张志强等<sup>[7]</sup>将其引入国内,从生物生产角度对区域的生态可持续程度进行定量评估。同时,该方法因操作更简单、定量分析结果更精确而得到广大学者的认同。梳理相关文献发现<sup>[8-14]</sup>,以往的研究尺度主要以行政单元为主,研究内容多为当前时段的现状分析,缺乏对未来发展趋势的动态预测。今在借鉴已有研究成果的基础上,将渭河干流甘肃段自然区与流域所辖的县域行政区相联系,以“省公顷”(s-nhm<sup>2</sup>)为单位实现现状分析与未来预测的结合,明确渭河干流甘肃段生态需求和供给,对实现流域生态治理和促进其高质量发展具有积极的预警作用。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

渭河干流甘肃段地理范围介于 E104° 00' ~ E108° 45', N34° 12' ~ N36° 10' 之间,干流全长约 315.8 km,占渭河干流全长的 38.61%,是“古丝绸之路”的重要枢纽区,也是甘肃省粮食的主产区,区域范围包括定西、天水两市的渭源、陇西、武山、甘谷、秦州和麦积 6 个县区(见图 1)。2018 年渭河干流甘肃段流域总人口为 304.91 万人,人均生产总值 26 990.4 元,创造了甘肃省 7.58% 的 GDP。天水市秦州区虽属渭河支流藉河流域,但考虑到该区人口稠密,经济发达,种植面积较大,对该流域生态安全影响较大,故将其纳入研究中。

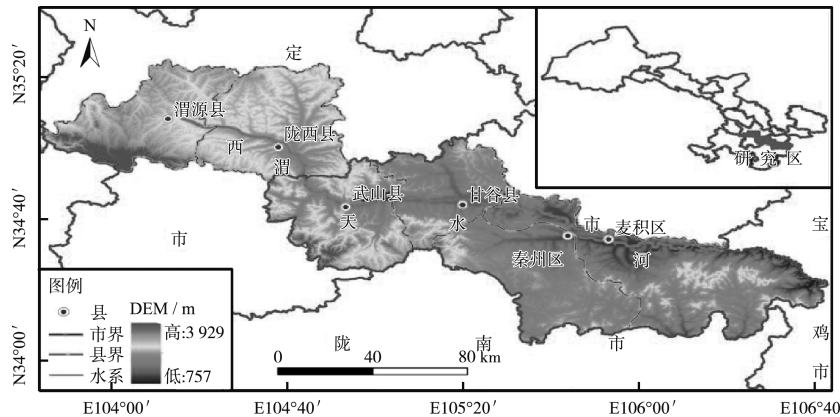


图 1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

### 1.2 数据来源及处理

文中采用的生物资源消费、能源资源消费和各类土地面积数据来源于 2010—2019 年的《甘肃发展年鉴》《甘肃农村年鉴》《定西统计年鉴》和《天水经济年鉴》;单位热值数据来源于《技术经济手册》(农业卷)。在因子计算时,将年鉴中的能源当量转化为能源消费量,折算系数如下:焦炭为 0.971 4 kg 标准煤/kg,汽油为 1.471 4 kg 标准煤/kg,煤油为 1.471 4 kg 标准煤/kg,柴油为 1.457 1 kg 标准煤/kg,电力为 0.122 9 kg 标准煤/(kW·h)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 模型参数计算

在借鉴学者对模型参数计算方法的基础上,以“省公顷”为单位重新计算流域的均衡因子和产量因子。为了更准确地反映流域的生态盈亏情况,对

土地类型进行调整<sup>[15]</sup>:将园地划分在林地中;将交通运输用地与城镇及工矿用地归于建设用地中;由于林地和草地均能吸收一定的 CO<sub>2</sub> 等废气,故将林地和草地作为化石能源用地的测算对象。公式为:

$$eF_i = \frac{\bar{P}_i}{\bar{P}} = \left( \frac{B_i}{S_i} \right) / \left( \frac{\sum B_i}{\sum S_i} \right) \quad (1)$$

$$yF_i^j = \frac{\bar{P}_i^j}{\bar{P}_i} = \left( \frac{B_i^j}{S_i} \right) \times \left( \frac{B_i}{S_i} \right) \quad (2)$$

式中:  $eF_i$  为省域第  $i$  类土地的均衡因子;  $yF_i^j$  为第  $j$  县第  $i$  类土地的产量因子;  $\bar{P}_i$  为省域第  $i$  类土地的平均生产力,  $10^3 \text{ J/hm}^2$ ;  $\bar{P}_i^j$  为第  $j$  县第  $i$  类土地的平均生产力,  $10^3 \text{ J/hm}^2$ ;  $\bar{P}$  为省域内全部土地的平均生产力,  $10^3 \text{ J/hm}^2$ ;  $B_i$  为第  $i$  类土地的总产出

量,  $10^3 \text{ J}$ ;  $S_i$  为第  $i$  类土地的总生物生产性面积,  $\text{hm}^2$ ;  $B_i^j$  为第  $j$  县第  $i$  类土地的总产出量,  $10^3 \text{ J}$ ;  $S_i^j$  为第  $j$  县第  $i$  类土地的总面积,  $\text{hm}^2$ 。

1.3.2 改进生态足迹模型

生态足迹表示在一定人口规模下“被占用的生态承载力”,用来衡量流域自然资源的可持续利用状况。公式为:

$$EF = N \times ef = N \times \left( \sum eF_i \times B_i / \bar{P}_i \right) \quad (3)$$

式中:  $EF$  为研究区域的生态足迹,  $\text{s-nhm}^2$ ;  $ef$  为研究区域人均生态足迹,  $\text{s-nhm}^2/\text{人}$ ;  $N$  为研究区域的总人口数, 人。

生态承载力是某一区域资源与环境系统的供给能力,也是生态系统的自我维持与自我调节能力。公式为:

$$EC = N \times ec = N \times \left( \sum S_i \times eF_i \times yF_i \right) \quad (4)$$

式中:  $EC$  为研究区域的生态承载力,  $\text{s-nhm}^2$ ;  $ec$  为研究区域人均生态承载力,  $\text{s-nhm}^2/\text{人}$ 。

1.3.3 GM(1,1)预测模型

GM(1,1)模型是20世纪80年代由宋中民等<sup>[16]</sup>提出的一种对原始数据进行反向累加得到规律性预测的模型,主要解决“小样本”“贫信息”的不确定性问题,其优点在于原始数据需求量少,能

实现高精度预测,且易于检验。模型最终预测结果如下:

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = \left( x_1^{(0)} - \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \right) e^{-\hat{a}k} + \frac{\hat{b}}{\hat{a}}, k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 “省公顷”下模型的账户及参数分析

表1为渭河干流甘肃段生态足迹账户构成及基本参数。

由表1可知,从均衡因子来看,耕地是流域内最具有生物生产性能力的土地类型,每  $1 \text{ hm}^2$  耕地的生产能力相当于0.035 14单位“省公顷”土地的生产能力,是水域的270倍,是草地的42.9倍。水域生产力低的原因在于以淡水产品代替整个渔业水域,并未考虑海洋渔业;草地生产力低的原因在于流域位于生态脆弱区,草地面积本身不足,且多为干草地,生产条件较低。从6类土地类型的产量因子排序来看,耕地 = 建筑用地 > 林地 > 水域 > 草地 > 化石能源用地,与流域内6类土地面积呈正相关关系,可见土地面积是影响产出的重要因素。其中,因为化石能源用地是一种“假想”用地,现实中并不存在,所以产量因子为0<sup>[17]</sup>。

表1 渭河干流甘肃段生态足迹账户构成及基本参数

Table 1 Composition and basic parameters of ecological footprint account of Gansu section of Weihe River

生物生产性土地类型	指标细则	均衡因子	产量因子
耕地	粮食、蔬菜、油料、药材、甜菜、猪肉	0.035 14	0.310 15
林地	羊肉、牛肉、绵羊毛、牛奶、禽蛋	0.000 87	0.012 84
草地	苹果、梨、葡萄、桃子、杏子	0.000 82	0.007 82
水域	淡水产品	0.000 13	0.011 41
建筑用地	电力	0.035 14	0.310 15
化石能源用地	焦炭、汽油、煤油、柴油	0.000 87	0

2.2 渭河干流甘肃段生态足迹和生态承载力分析

表2为2009—2018年渭河干流甘肃段生态足迹和生态承载力。

由表2可知,2009—2018年渭河干流甘肃段生态足迹的下降比率为6.75%。渭源、陇西、武山、甘谷和麦积5县区的生态足迹波动下降,陇西县和武山县的生态足迹下降比率达到5.96%和5.43%,下降较明显;秦州区的生态足迹以11.73%的比率波动上升。2009—2018年渭河干流甘肃段生态承载力的下降比率为5.07%。渭源、陇西、甘

谷、秦州和麦积5县区生态承载力逐年降低,渭源县和陇西县的生态承载力分别以5.00%和5.08%的速率快速下降,武山县的生态承载力以5.31%的比率波动上升。总体而言,天水市4县区的平均生态足迹远大于定西市2县区的平均生态足迹,说明天水市经济发展更加迅速,生态环境破坏更为严重。

2.2.1 人均生态足迹动态变化

图2为2009—2018年渭河干流甘肃段各地类人均生态足迹动态变化。

表 2 2009—2018 年渭河干流甘肃段生态足迹和生态承载力

s-nhm<sup>2</sup>

Table 2 Ecological footprint and ecological carrying capacity of Gansu section of Weihe River from 2009 to 2018 s-nhm<sup>2</sup>

项目	年份	渭源县	陇西县	武山县	甘谷县	秦州区	麦积区
生态足迹	2009 年	3 187.07	6 488.62	10 517.79	10 325.44	18 794.28	18 794.04
	2010 年	2 724.98	5 190.20	9 415.46	27 914.01	17 652.90	17 477.96
	2011 年	2 528.30	4 887.60	9 317.88	24 698.61	17 659.92	17 073.90
	2012 年	2 492.89	4 923.24	9 654.54	24 720.10	18 432.77	17 299.95
	2013 年	3 510.32	4 485.23	9 691.83	24 908.10	18 799.10	17 510.73
	2014 年	4 245.06	3 715.91	9 841.55	22 993.40	20 220.82	18 333.35
	2015 年	4 514.82	7 224.48	8 717.37	18 267.12	21 564.35	19 600.04
	2016 年	3 303.35	5 634.26	9 275.30	16 917.09	23 058.51	21 087.19
	2017 年	3 885.35	4 862.76	8 005.85	11 866.90	23 904.17	21 194.28
	2018 年	3 129.32	4 064.83	6 817.20	9 852.11	21 291.69	18 643.96
生态承载力	2009 年	333.11	1 977.62	783.46	762.06	1 494.65	4 128.51
	2010 年	221.71	1 595.79	659.71	2 314.51	1 385.84	3 866.83
	2011 年	201.74	1 454.57	672.83	2 092.03	1 429.44	3 834.79
	2012 年	193.17	1 373.42	689.46	2 064.46	1 485.04	3 893.59
	2013 年	262.81	1 056.86	663.62	2 018.76	1 472.53	3 941.62
	2014 年	314.07	774.92	671.37	1 838.47	1 593.52	4 121.62
	2015 年	318.96	3 766.42	547.54	1 386.80	1 686.86	4 400.76
	2016 年	239.86	1 081.36	592.42	1 287.41	1 827.85	4 781.97
	2017 年	217.03	1 015.69	508.42	827.39	1 826.46	4 848.02
	2018 年	173.30	974.00	827.39	478.07	1 135.52	4 077.70

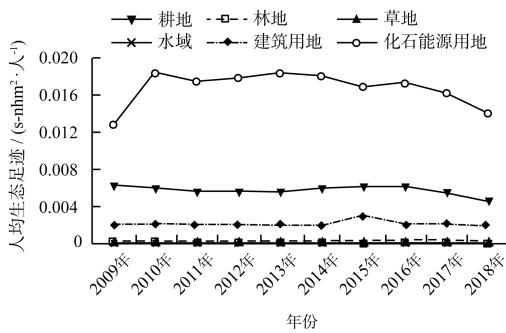


图 2 2009—2018 年渭河干流甘肃段各地类人均生态足迹动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of per capita ecological footprint in various land types in Gansu section of Weihe River from 2009 to 2018

由图 2 可见,2009—2018 年渭河干流甘肃段各地类人均生态足迹整体呈下降趋势,原因主要是受人均资源消耗量减少、产业结构调整及节能减排作用的影响。其中,林地和水域的人均生态足迹在十年期间变化不大,林地仅上升 2.35%,水域下降 2.52%;建筑用地和化石能源用地变化率超过 9.00%,是该流域人均生态足迹的主要贡献者,尤其是 2010 年化石能源用地人均生态足迹占总生态足迹的 68.27%,说明流域内的居民对化石能源类产品的需求量大幅增加,也反映流域所辖的两市区工业发展对化石能源的消耗量较大;耕地是面积最

大的土地类型,对流域的生态足迹影响也较大,仅次于化石能源用地。从图 2 看出,耕地的人均生态足迹在十年期间变化并不明显,2013 年之前以 2.36% 速率逐年下降,2014—2016 年之间以 1.11% 速率缓慢上升,2016 年之后缓慢下降并趋于平缓。同时发现该流域耕地的人均生态足迹与总人口数量呈负相关关系,即人口变化影响耕地的人均生态足迹。

### 2.2.2 人均生态承载力动态变化

图 3 为 2009—2018 年渭河干流甘肃段各地类人均生态承载力动态变化。由图 3 可见,耕地、草地、水域、建筑用地和化石能源用地的人均生态承载力波动下降。耕地从 2009 年的 0.000 34 s-nhm<sup>2</sup>/人波动下降到 2018 年的 0.000 124 s-nhm<sup>2</sup>/人,年均下降率为 6.35%,其次依次为水域(5.09%)、化石能源用地(4.65%)、草地(3.74%)和建筑用地(0.3%),下降原因与上述 5 类土地的面积减少有关。很明显,建筑用地人均生态承载力在所有地类人均生态承载力中的比例保持在 56.55% ~ 76.68% 之间,尤其是在 2015 年建筑用地人均生态承载力数值达到最大,说明建筑用地生态容量大,可开发利用程度高,且该现象在 2015 年最为明显。林地的人均生态承载力以每年 0.56% 的速率缓慢上升,主要得益于相关产业结构的调整及退耕还林政策的实施。

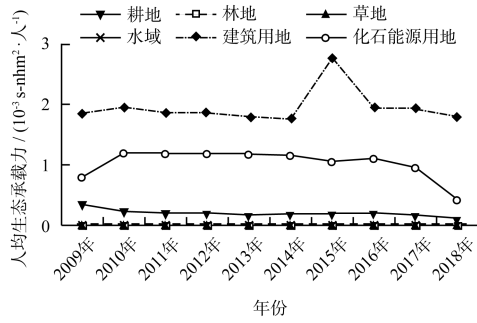


图 3 2009—2018 年渭河干流甘肃段各类人均生态承载力动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of per capita ecological carrying capacity in various land types in Gansu section of Weihe River from 2009 to 2018

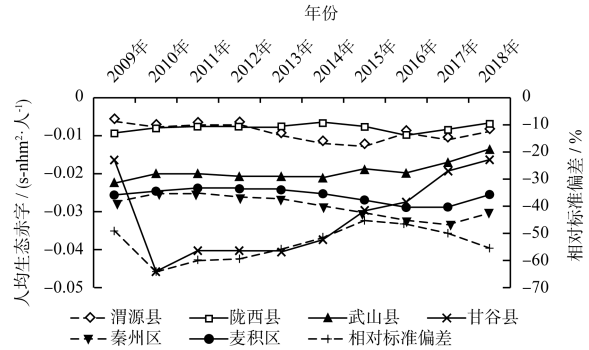


图 4 2009—2018 年渭河干流甘肃段 6 县区人均生态赤字/盈余及相对标准偏差动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of per capita ecological deficit/surplus and relative standard deviation in 6 counties and districts in Gansu section of Weihe River from 2009 to 2018

### 2.2.3 人均生态赤字/盈余动态变化

利用人均生态足迹和人均生态承载力之间的差额判断流域人均生态赤字/盈余状态(见图 4)。由图 4 可见,2009—2018 年十年期间流域都处于生态赤字状态,尤其是甘谷县、秦州区和麦积区生态环境不容乐观。利用相对标准偏差对流域整体人均生态赤字进行分析,2009—2018 年相对标准偏差均为负值,稳定于 -53.7% 附近,呈现先降后升再降的趋势,表明该流域消耗能源资源来弥补生态承载力不足的状况得以缓解。

### 2.3 渭河干流甘肃段生态足迹和生态承载力预测结果与分析

依据 2009—2018 年渭河干流甘肃段人均生态足迹和人均生态承载力实际值与模拟值之间的比较结果(见表 3),利用 Matlab 软件建立 GM(1,1)

模型,对 2019—2028 年渭河干流甘肃段人均生态足迹和人均生态承载力进行预测。

人均生态足迹的 GM(1,1)模型为:

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = -1.574744e^{-0.017494k} + 1.596273 \quad (6)$$

人均生态承载力的 GM(1,1)模型为:

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = -0.181380e^{-0.019208k} + 0.184376 \quad (7)$$

预测检验结果见表 3,实际值和模拟值之间的相对误差分别为 3.88% 和 6.95%,两者预测精度均保持在 93% 以上,说明将 GM(1,1)运用到渭河干流甘肃段生态足迹和生态承载力的预测中可信度较高。由此可得 2019—2028 年渭河干流甘肃段人均生态足迹和人均生态承载力的预测结果(见表 4)。2019—2028 年流域人均生态足迹以每年 0.0003 s-nhm<sup>2</sup>/人下降,人均生态承载力以每年

表 3 2009—2018 年渭河干流甘肃段人均生态足迹和人均生态承载力实际值与模拟值比较 s-nhm<sup>2</sup>/人  
Table 3 Comparison between actual value and simulated value of per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity in Gansu section of Weihe River from 2009 to 2018 s-nhm<sup>2</sup>/person

年份	人均生态足迹			人均生态承载力		
	实际值	模拟值	残差	实际值	模拟值	残差
2009 年	0.021 5	0.021 5	0	0.003 0	0.003 0	0
2010 年	0.027 0	0.027 3	-0.000 3	0.003 4	0.003 5	-0.000 1
2011 年	0.025 6	0.026 8	-0.001 2	0.003 3	0.003 4	-0.000 1
2012 年	0.026 0	0.026 4	-0.000 4	0.003 2	0.003 3	-0.000 1
2013 年	0.026 4	0.025 9	0.000 5	0.003 1	0.003 3	-0.000 2
2014 年	0.026 4	0.025 5	0.000 9	0.003 1	0.003 2	-0.000 1
2015 年	0.026 6	0.025 0	0.001 6	0.004 0	0.003 1	0.000 9
2016 年	0.026 3	0.024 6	0.001 7	0.003 2	0.003 1	0.000 1
2017 年	0.024 3	0.024 2	0.000 1	0.003 0	0.003 0	0
2018 年	0.020 9	0.023 7	-0.002 8	0.002 3	0.003 0	-0.000 7

0.000 5 s-nhm<sup>2</sup>/人的速率降低,表明如果按照当前的发展模式,那么渭河干流甘肃段对自然资源存量的消耗将逐年减少;2019—2028 年流域虽然仍处于生态赤字状态,但生态赤字逐年缩小,预计到 2028 年,流域生态赤字较 2018 年降低 16.27%,说明虽然渭河干流甘肃段对自然资源的消费依旧超过当地生态承载力,人地关系紧张,生态环境处于不安全状态,但不安全状态有所缓解。

表 4 2019—2028 年渭河干流甘肃段人均生态足迹和人均生态承载力预测 s-nhm<sup>2</sup>/人  
Table 4 Prediction of per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity in Gansu section of Weihe River from 2019 to 2028

年份	人均生态足迹	人均生态承载力	人均生态赤字
2019 年	0.023 3	0.002 9	-0.020 4
2020 年	0.022 9	0.002 8	-0.020 1
2021 年	0.022 5	0.002 8	-0.019 7
2022 年	0.022 1	0.002 7	-0.019 4
2023 年	0.021 8	0.002 7	-0.019 1
2024 年	0.021 4	0.002 6	-0.018 8
2025 年	0.021 0	0.002 6	-0.018 4
2026 年	0.020 6	0.002 5	-0.018 1
2027 年	0.020 3	0.002 5	-0.017 8
2028 年	0.019 9	0.002 4	-0.017 5

### 3 结论

(1) 运用改进生态足迹模型从时间尺度上(2009—2018 年)对渭河干流甘肃段 6 类生物生产性土地的人均生态足迹和人均生态承载力进行测算和分析发现,生态承载力的下降比率(4.18%)高于生态足迹的下降比率(2.26%),说明生态环境不容乐观。

(2) 渭河干流甘肃段生态赤字在研究时段里呈波动下降趋势,且时空分布差异特征明显。渭源县和秦州区分别以 5.14% 和 2.49% 的速率波动上升,其余 4 县区均呈现波动下降趋势,表明除渭源、秦州两县区外,其余 4 县区生态环境不同程度上得以缓解,甘谷县最为明显。

(3) 利用 GM(1,1) 模型对 2019—2028 年渭河干流甘肃段人均生态足迹和生态承载力进行预测。研究期间,人均生态足迹和人均生态承载力分别以每年 0.000 3 s-nhm<sup>2</sup>/人和 0.000 5 s-nhm<sup>2</sup>/人的速度持续下降,同时流域生态赤字较 2018 年降低

16.27%,说明流域生态不安全状态有所缓解。

### [参考文献]

[1] 李继影,牛志春,陈桥,等.江苏省太湖流域水生态健康评估的初步实践及展望[J].环境监测管理与技术,2018,30(5):1-3.

[2] 艾雪,李中宇,赵然,等.松花江流域生物完整性时空变化分析[J].环境监测管理与技术,2020,32(4):34-37.

[3] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization,1992,4(2):121-130.

[4] 盛芝露,赵筱青,李佩泽.中国流域生态系统健康评价研究进展[J].云南地理环境研究,2011,23(2):52-58.

[5] WACKERNAGEL M,ONISTO L,BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics,1999,29(3):375-390.

[6] WACKERNAGEL M. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: a tool for planning toward sustainability[D]. Columbia:University of British Columbia,1994.

[7] 张志强,徐中民,程国栋.生态足迹的概念及计算模型[J].生态经济,2000(10):8-10.

[8] WACKERNAGEL M,REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective[J]. Ecological Economics,1997,20(1):3-24.

[9] DE MIGUEL Á,HOEKSTRA A Y,GARCÍA-CALVO E. Sustainability of the water footprint of the Spanish pork industry[J]. Ecological Indicators,2015,57:465-474.

[10] CHAKRABORTY D,ROY J. Ecological footprint of paperboard and paper production unit in India[J]. Environment, Development and Sustainability,2015,17(4):909-921.

[11] 王丽萍,夏文静.基于生态足迹理论的中部六省可持续发展评价研究[J].环境保护,2018,46(10):38-43.

[12] 徐建平,林晓言.中国城市客运交通生态足迹测算——以北京市为例[J].城市问题,2015(9):74-80.

[13] 李剑泉,田康,陈绍志.国际贸易生态足迹评估方法研究进展[J].世界农业,2016(5):41-47.

[14] 贾秀红,汪文涛,胡云,等.基于生态足迹成分法的太子山国家森林公园旅游承载力研究[J].华中农业大学学报,2020,39(4):57-62.

[15] 杨雪菽,白永平,车磊,等.甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析[J].生态学报,2020,40(14):4785-4793.

[16] 宋中民,邓聚龙.反向累加生成及灰色 GOM(1,1)模型[J].系统工程,2001,19(1):66-69.

[17] 张恒义,刘卫东,王世忠,等.“省公顷”生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算——以浙江省为例[J].自然资源学报,2009,24(1):82-92.