

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.016

黄河沿线9省区水土资源生态承载力耦合协调分析

赵子萌¹, 曹永强², 常志冬¹, 王菲¹

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029; 2. 天津师范大学京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387)

摘要:基于生态足迹模型探讨了黄河沿线9省区水土资源生态足迹和生态承载力时空变化特征,借助耦合协调度模型定量分析了当前水土资源生态承载力协调状况,并进行了耦合协调等级划分。结果表明:2006—2020年9省区人均水资源生态足迹呈下降趋势,在 $0.70 \sim 0.78 \text{ hm}^2$ 之间,省区间水资源生态状况差距明显,除四川、青海、陕西3省外,其余6省区均处于水资源不可可持续发展状态;2006—2020年9省区人均土地资源生态足迹呈显著上升趋势,在 $2.87 \sim 5.13 \text{ hm}^2$ 之间,土地资源生态状况空间上存在较大差异,除山东、四川和陕西3省外,其余6省区土地资源均处于不可可持续发展状态;9省区水土资源生态承载力耦合协调度在 $0.2 \sim 0.6$ 之间,多数省区处于失调状态;总体来看,9省区水土资源生态状况较差,应高度重视水土资源的协调发展。

关键词:生态足迹;水土资源;生态承载力;耦合协调;黄河沿线9省区

中图分类号:X24; TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2023)06-0121-09

Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River//ZHAO Zimeng¹, CAO Yongqiang², CHANG Zhidong¹, WANG Fei¹ (1. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. Academy of Eco-civilization Development for Jing-Jin-Ji Megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Based on the ecological footprint model, the spatial-temporal characteristics of ecological footprint and ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River were discussed. The current coordination status of ecological carrying capacity of water and land resources was quantitatively analyzed by means of the coupling coordination degree model, and the coupling coordination level was classified. The results show that from 2006 to 2020, the ecological footprint of water resources per capita in the nine provinces had a downward trend, ranging from 0.70 to 0.78 hm^2 . Spatially, there was great difference between the ecological state of water resources of the nine provinces, except Sichuan, Qinghai, and Shaanxi, water resources of the other six provinces were in an unsustainable development state. From 2006 to 2020, the ecological footprint of land resources per capita in the nine provinces showed a significant upward trend, ranging from 2.87 to 5.13 hm^2 . Spatially, there was great difference in the ecological state of land resources, except Shandong, Sichuan, and Shaanxi provinces, the land resources of the other six provinces were in an unsustainable state. The coupling coordination degree of ecological carrying capacity of water and land resources in the nine provinces was in the range of 0.2 to 0.6 , and most provinces were out of adjustment. In general, the ecological conditions of water and land resources in the nine provinces are poor, and the coordinated development of water and land resources should be highly valued.

Key words: ecological footprint; water and land resources; ecological carrying capacity; coupling coordination; nine provinces along the Yellow River

目前,全球气候变化和人类活动明显影响了水土资源状态,水土资源供需矛盾和生态压力日益凸

显^[1]。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》和《黄河保护法》中都强调了保护水土资源对促

基金项目:长江水利委员会长江科学院2016年对外开放研究基金项目(CKWV2016392/KY);“一带一路”水与可持续发展科技重点基金项目(2021nkzd02);国家自然科学基金项目(52379021,52079060)

作者简介:赵子萌(1999—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:1563312942@qq.com

通信作者:曹永强(1972—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:caoyongqiang@lnnu.edu.cn

进区域协调发展的重要意义,明确指出黄河流域生态保护和高质量发展目标的实现需要9省区共同行动^[2]。在工业化和城市化迅速发展的过程中,为解决水土资源短缺与生态恶化之间的矛盾,实现水土资源高效利用,促进全流域高质量发展,就必须明确当前沿黄9省区的水土资源状况。

生态足迹是由 Rees 等^[3-4]提出并完善形成的,其广泛应用于可持续性程度的度量与比较,具有较强的可复制性和利用性。1999 年生态足迹的概念首次引入国内,张志强等^[5-7]在中国最早开展有关生态足迹的研究。目前,在水资源生态足迹方面,Ewing 等^[8]在区域投入产出框架下整合生态足迹和水足迹,对计算模型进行了优化改进;杨一旸等^[9]引入足迹深度与广度改进生成了三维生态足迹模型,二者均实现了核算上的新突破;王文国等^[10]基于评价角度,在传统核算方法的基础上,将生态盈亏指数、压力指数和万元 GDP 生态足迹相结合,对四川省和北京市水资源生态状况进行评价;夏军等^[11]从生态安全状况角度出发,利用生态足迹模型明确鄱阳湖流域水资源生态安全状况;安慧等^[12]采用 BP 神经网络对水资源生态足迹进行预测;洪思扬等^[13-14]在综合前人评价方法的基础上,运用对数平均迪氏指数分解法对水资源生态足迹的驱动因素进行了更深入系统的研究。在土地资源生态足迹方面,Lenzen 等^[15]、郑艳茹等^[16]基于土地资源生态足迹法分别对澳大利亚和我国河北省土地资源生态足迹进行了核算,体现出土地资源生态足迹模型在不同研究区的超强适用性;王业宁等^[17]依据内蒙古当地各类土地状况对均衡因子和产量因子进行更新细化和长达 20 年生态承载力的研究,其结果对内蒙古生态承载力的监测预警具有重要意义;李鹏辉等^[18-20]突破传统土地生态安全和可持续发展评价角度的研究,将生态足迹理论与自然资源资产负债表相结合,分析不同地区土地资产变化,拓宽了土地资源生态足迹的研究视角。

前人的研究中,基于生态足迹法对某研究区水资源或土地资源生态承载力单独进行研究的成果有很多,但将水土资源耦合为一个系统的研究较少。单一水资源或土地资源生态承载力状况分析不能反映其在生态和流域协同发展中所起的正向或逆向作用,利用耦合协调度模型对水资源和土地资源生态承载力进行耦合协调分析能够从定量角度明确水土资源的协调状况,找出制约水土资源协调发展的薄弱点,进而进行针对性的整治。本文以黄河沿线9省区为研究对象,以 2006—2020 年水资源和土地资源相关消费数据为依据,分析水土资源生态足迹及

生态承载力时空分布,再利用耦合协调模型计算出水土资源生态承载力耦合协调度,并对9省区进行协调等级划分,以期为黄河流域水土资源协同整治与规划提供理论参考。

1 研究区概况

黄河全长 5 464 km,呈“几”字形流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东9省区。黄河沿线9省区总面积约为 356.86 万 km²,占全国总面积的 37.17%;2020 年9省区总人口为 4.21 亿,占全国总人口的 29.85%;水资源总量为 6 490 亿 m³,占全国水资源总量的 20.54%。研究区作为重要的工农业生产基地和国家促进区域协调发展的重点地区,存在着两大问题:一是生态本底差,资源环境承载能力弱,水土资源问题突出;二是各省区产业倚靠能源与传统重工业,生产质量水平与效率低,协同发展能力弱,高质量发展不充分^[2,21]。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 水资源计算模型

a. 人均水资源生态足迹模型。水资源生态足迹表示区域的水资源代谢强度,可以反映区域水资源的消耗水平^[22]。水资源生态足迹的计算公式为

$$f_{ew} = R_w \frac{W/P_w}{N} \quad (1)$$

式中: f_{ew} 为人均水资源生态足迹; N 为区域人口数; R_w 为水资源全球均衡因子,取值为 5.19^[22]; W 为区域水资源消耗量; P_w 为水资源全球生产能力,取值为 3 140 m³/hm²^[22]。

b. 人均水资源生态承载力模型。水资源承载力是区域特定时间段内,水资源对社会经济发展的最大承载能力。通常一个地区将 60% 的水用于维持生态环境,40% 的水用于满足人类社会的发展需求,因此计算生态承载力时乘以 0.4^[22],其计算公式为

$$c_{ew} = \frac{0.4\psi R_w Q/P_w}{N} \quad (2)$$

式中: c_{ew} 为人均水资源生态承载力; Q 为区域水资源总量; ψ 为区域水资源的产量因子。

c. 水资源生态盈亏指数模型。水资源生态盈亏指数表示研究区水资源是否可持续利用^[23],其计算公式为

$$b_{ew} = c_{ew} - f_{ew} \quad (3)$$

式中 b_{ew} 为水资源生态盈亏指数。 $b_{ew} = 0$ 表示水资源生态平衡; $b_{ew} > 0$ 表示水资源生态盈余; $b_{ew} < 0$ 表示水资源生态赤字。土地资源生态盈亏指数亦应

用此模型。

d. 水资源生态压力指数模型。水资源生态压力用于评估区域水资源是否健康^[23],其计算公式为

$$s_w = f_{ew}/c_{ew} \tag{4}$$

式中 s_w 为水资源生态压力指数。 $s_w = 1$ 表示水资源生态环境供给平衡, s_w 越大, 水资源生态环境恶化威胁越严重。土地资源生态压力指数亦应用此模型。

2.2 土地资源计算模型

a. 人均土地资源生态足迹模型。土地资源生态足迹的计算由 2 个消费账户组成, 共 6 类土地类型, 28 种商品(表 1)。通过均衡因子对 6 类生物生产性土地面积进行均衡化, 最后求和得到生态足迹^[24]。土地资源生态足迹计算公式为

$$f_{el} = \sum_{j=1}^6 a_j r_j \tag{5}$$

其中

$$a_j = \sum_i c_{ji}/p_{ji}$$

式中: f_{el} 为人均土地资源生态足迹; a_j 是为人均占有的第 j 类土地类型面积; r_j 为 j 类土地类型均衡因子; c_{ji} 为第 j 类土地类型中第 i 类商品的人均消费量; p_{ji} 为第 j 类土地类型中第 i 类消费商品的全球平均生产能力。

表 1 土地资源生态足迹消费账户

Table 1 Consumption account of ecological footprint of land resources

消费账户	土地类型	商品
生物账户	耕地	稻谷、小麦、玉米、豆类、油料、薯类、棉花、麻类、糖类、烟叶、蔬菜
	林地	水果
	草地	猪肉、牛肉、羊肉、蛋、奶、山羊毛、绵羊毛
	水域	水产
能源账户	能源用地	煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、天然气
	建设用地	电力

b. 人均土地资源生态承载力模型。土地资源生态承载力是指某一区域土地所能够提供的全部自然资源, 换算成 6 类生物生产性土地后的总面积, 计算时要扣除 12%, 用于生物多样性保护^[24]:

$$c_{el} = (1 - 12\%) \sum_{j=1}^6 a_j r_j y_j \tag{6}$$

式中: c_{el} 为人均土地资源生态承载力; y_j 为第 j 类土地类型的产量因子。

2.3 水土资源生态承载力耦合协调模型

水土资源生态承载力耦合协调模型是基于传统的系统耦合协调模型而建立的^[25-26], 计算公式为

$$D = \sqrt{C(\alpha c_{ew} + \beta c_{el})} \tag{7}$$

其中 $C = 2 \sqrt{c_{ew} c_{el} / (c_{ew} + c_{el})^2}$ 式中: C 为耦合度, $C \in [0, 1]$; α, β 为耦合协调系数, 因水土资源同等重要, 所以 $\alpha = \beta = 0.5$ ^[26]; D 为耦合协调度, 在 $[0, 1]$ 区间变化, 将其划分为 10 个等级(表 2), 对应耦合协调程度从极度失调到优质协调的变化。

表 2 耦合协调度等级

Table 2 Coupling coordination level

耦合协调度	协调等级	耦合协调程度	耦合协调度	协调等级	耦合协调程度
[0, 0.1)	1	极度失调	[0.5, 0.6)	6	勉强协调
[0.1, 0.2)	2	严重失调	[0.6, 0.7)	7	初级协调
[0.2, 0.3)	3	中度失调	[0.7, 0.8)	8	中级协调
[0.3, 0.4)	4	轻度失调	[0.8, 0.9)	9	良好协调
[0.4, 0.5)	5	濒临失调	[0.9, 1.0]	10	优质协调

2.4 数据来源

水资源基础数据(水资源总量和水资源消耗量)来自 9 省区《水资源公报》, 土地资源基础数据(28 种商品的消费量)以及计算中所用到的人口数据均来源于 9 省区《统计年鉴》。水资源产量因子依据黄林楠等^[22, 27]的研究, 土地资源均衡因子和产量因子均基于净初级生产力的算法, 借鉴了刘某承等^[28-29]的研究成果。

3 结果与分析

3.1 水资源生态足迹与生态承载力分析

图 1 为黄河沿线 9 省区 2006—2020 年人均水资源生态足迹。总体来看, 人均水资源生态足迹呈现下降态势, 但近两年略有微升; 人均水资源生态足迹在 2006 和 2018 年分别出现最大值(0.78 hm²)和最小值(0.70 hm²)。宁夏、青海、山东人均水资源生态足迹呈现明显下降的趋势, 青海多年平均变化率为 -1.44%; 四川、山西、内蒙古增长明显, 山西多年平均变化率为 5.35%。9 省区间差异较大, 宁夏、内蒙古、青海、甘肃人均水资源生态足迹较大, 宁夏 2006 年出现最大值, 为 2.14 hm²; 而山西、陕西、河南、山东、四川较小, 山西 2009 年出现最小值, 为 0.27 hm²。分析其波动变化的原因可能是人口效应、经济发展方式、产业结构占比和工农业生产节水技术的影响。宁夏三次产业结构占比由 2006 年的 11.2%、49.2% 和 39.6% 调整至 2020 年的 8.6%、41% 和 50.4%。2006 年宁夏农业耗水量占比高达 93.9%, 作为粮食作物的小麦、玉米、水稻和经济作物的棉花在宁夏广泛种植, 是宁夏的主要作物, 4 者均为高耗水作物。随着第一、二产业占比的降低和第三产业占比的增长, 水资源耗用结构不断改善, 同时宁夏灌区推广应用喷灌、滴灌、微灌、膜下滴灌等节

灌技术,压减玉米等高耗水农作物,发展葡萄、枸杞、黄花菜等高效节水灌溉特色农业^[27],2020年宁夏水资源农业耗水量占比降低为78.4%。而山西省农业灌溉用水不断增加是导致其水资源生态足迹增长的主要原因。山西2006年、2015年、2020年灌溉用水量分别为31.30亿、33.84亿、30.67亿 m^3 ,农业灌溉水量先增后减,说明山西近几年已经开始关注农业水资源利用效率低的问题,并发展高效节水灌溉。人均水资源生态足迹9省区间的差距与各省之间的经济发展结构和水资源利用效率的差异密切相关。

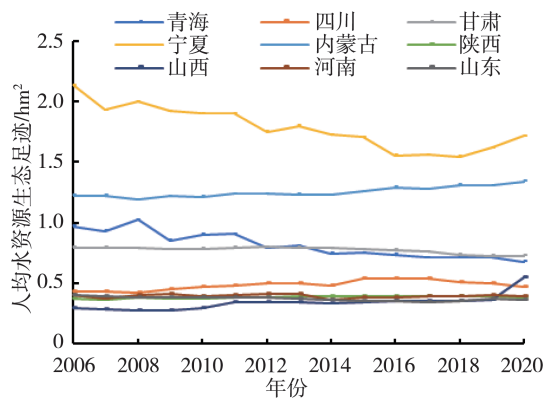


图1 9省区2006—2020年人均水资源生态足迹
Fig.1 Ecological footprint of water resources per capita in nine provinces from 2006 to 2020

2006—2020年黄河沿线9省区人均水资源生态承载力总体呈现波动上升趋势(图2),2006年均值为 0.61hm^2 ,2020年增至 0.99hm^2 ,水资源生态承载力状况正不断向好。但9省区间存在较大差异,四川、青海人均水资源生态承载力较高,2020年四川最高,为 4.50hm^2 ;其余7省区较低,宁夏水资源生态承载力多年变化率为 -0.07% ,15年来一直低于 0.01hm^2 ,发展趋势不容乐观,分析原因,水资源总量对其起决定性作用。受降水量、蒸发量等因素影响,9省区水资源总量年波动较大,人均水资源生

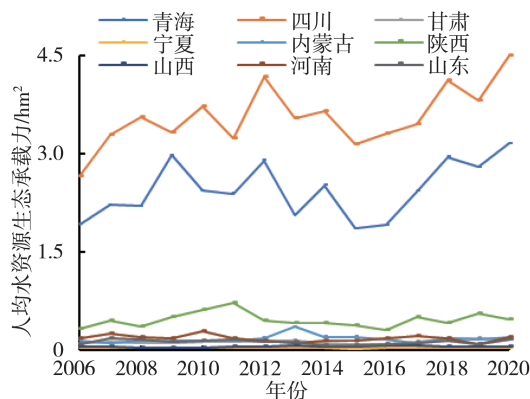


图2 9省区2006—2020年人均水资源生态承载力
Fig.2 Ecological carrying capacity of water resources per capita in nine provinces from 2006 to 2020

态承载力相应波动变化。2006年黄河流域为枯水年,2020年为丰水年,两个年份人均水资源生态承载力相差 0.38hm^2 。9省区跨度大,自然条件相差较大,降水量、蒸发量都存在着较大差异,这是9省区人均水资源生态承载力空间差异较大最主要的原因^[30]。以水资源承载力状况最好的四川和状况最差的宁夏为例,2020年四川、宁夏人均水资源总量分别为 $3\,867.23\text{m}^3$ 和 153.56m^3 ,两者相差近25倍。

黄河沿线9省区人均水资源生态盈亏和压力状况具有一致性,但9省区间存在较大差异(图3)。陕西2006—2020年水资源生态盈亏指数接近于0,生态压力指数接近于1,处于水资源可持续发展的均衡状态;青海、四川两省生态盈亏指数大于0,压力指数小于1,说明四川、青海水资源处于可持续发展状态,并且受生态环境恶化的影响比较小。四川多年平均盈余为3.06,压力指数为0.14,为9省

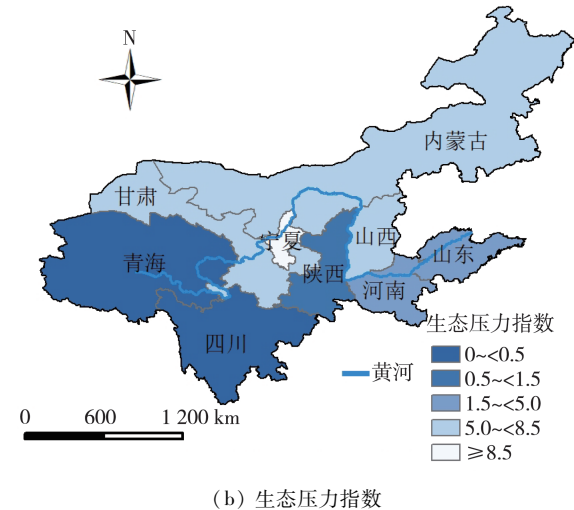
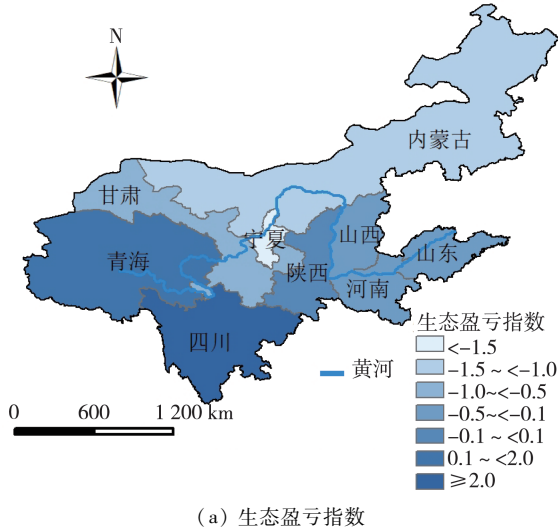


图3 9省区水资源生态盈亏指数与水资源生态压力指数
Fig.3 Ecological profit and loss index and ecological pressure index of water resources in nine provinces

区中水资源生态状况最好的省份。除四川、青海和陕西,其余6省区生态盈亏指数小于0,压力指数大于1,处于水资源生态不可持续发展和易遭受恶化威胁的状态。宁夏水资源生态状况最差,水资源已经达到严重恶化的不可持续发展状态。

3.2 土地资源生态足迹与生态承载力分析

由图4可知,2006—2020年黄河沿线9省区人均土地资源生态足迹不断增长,从2006年2.87 hm²增至2020年5.12 hm²。从沿线省级单元来看,青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、山东7省区均呈现快速增长的趋势,内蒙古增速最快,多年变化率达到了7.54%。四川、河南两省多年间相对平稳,变化不大。9省区间人均土地资源生态足迹存在较大差距,内蒙古、山西、山东人均土地资源生态足迹较大,其中内蒙古2020年最大,为17.31 hm²;青海、四川、甘肃、宁夏、陕西、河南则相对较小,其中四川2007年最小,为1.45 hm²。土地资源生态足迹变动与人口增长、经济发展水平、土地利用效率和城市化建设等有直接的联系。黄河沿线9省区和东部沿海一些地区相比,第一产业和第二产业占比相对较高,土地利用效率不高。黄河沿线9省区人口众多,能源消耗量大,生产生活消费需求大且消费日趋多元化,城市化建设不断推进,导致能源和建设用地的生态足迹不断攀升。以内蒙古为例,内蒙古作为重要的工农业生产大省,2006年其总播种面积为659万hm²,能源消耗量为11220.77万t,2019年分别增长至888.50万hm²和25346万t,2020年人均耕地和能源用地的生态足迹占人均土地资源总生态足迹的83.3%,二者是内蒙古土地资源生态足迹增长的主要因素。

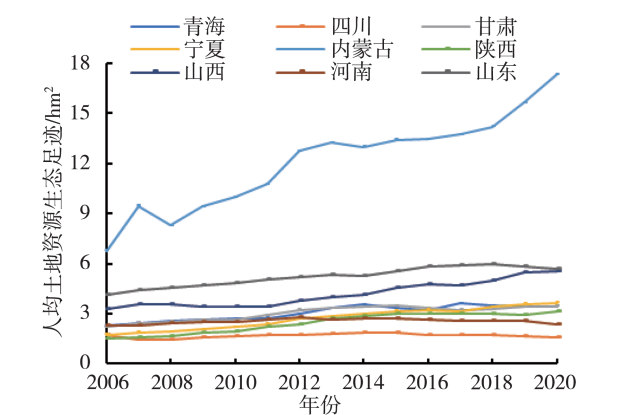


图4 9省区2006—2020年人均土地资源生态足迹
Fig.4 Ecological footprint of land resources per capita in nine provinces from 2006 to 2020

由2006—2020年人均土地资源生态承载力变化(图5)可知,黄河沿线9省区人均土地资源生态承载力呈现平稳上升态势。从沿线省级单元来看,

除四川、河南两省外,其他7省区人均土地资源生态承载力呈现明显增长态势。省区间人均土地资源生态承载力差距较大,其中内蒙古、山东两省人均土地资源生态承载力较高,内蒙古多年变化率最大,为7.51%,2020年内蒙古人均土地资源生态承载力最高,为14.99 hm²,2007年宁夏人均土地资源生态承载力最低,为1.18 hm²,最高值与最低值之间相差约12倍。9省区人均土地资源生态承载力增长的原因主要与土地集约化管理,植树种草,恢复生态植被,提高林地、草地生态承载力有关。内蒙古为改善生态,促进土地资源高效利用采取了一系列措施^[31],主要是在难利用、未利用土地上进行大面积风力发电和光伏发电,使用新能源以减少传统煤炭发电压力;对受破坏、已利用的矿山等地进行修复,发展观光旅游以及实施生态林建设。

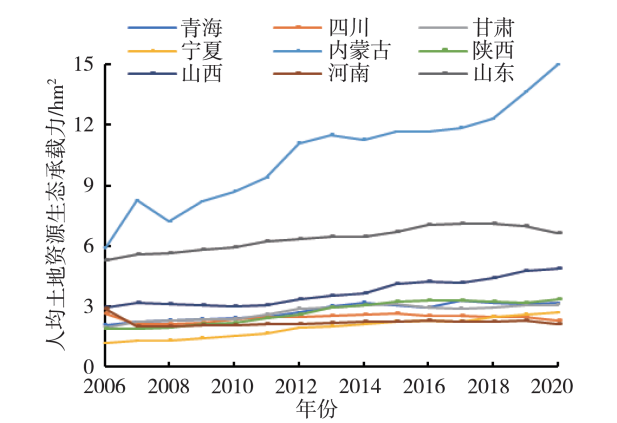
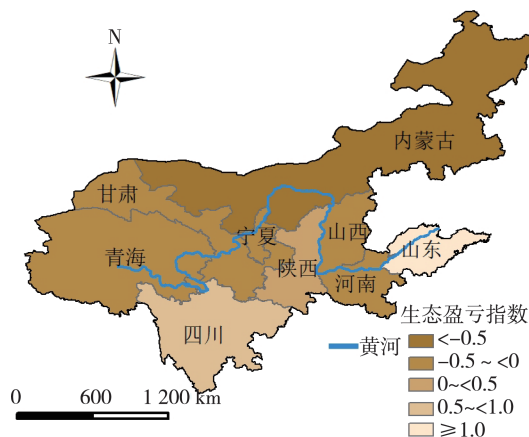
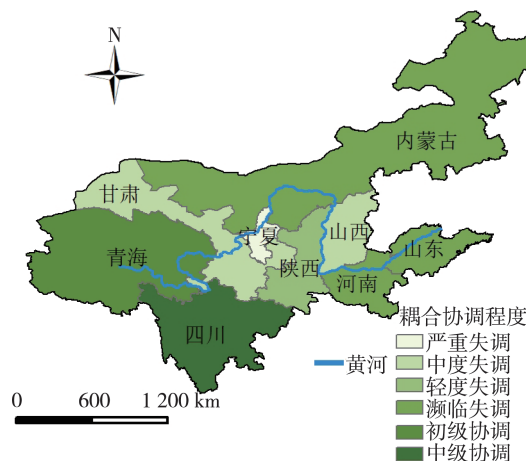


图5 9省区2006—2020年人均土地资源生态承载力
Fig.5 Ecological carrying capacity of land resources per capita in nine provinces from 2006 to 2020

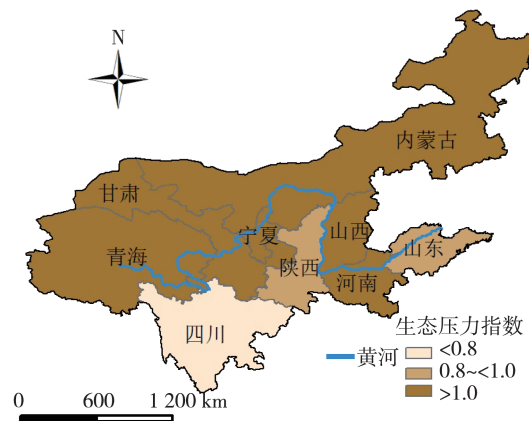
基于黄河沿线9省区的人均土地资源生态盈亏指数与压力指数分布可以看出,各省区间土地资源生态状况差异明显(图6)。山东、四川、陕西3省多年土地生态盈亏指数大于0,生态压力指数小于1,表明3省区土地资源生态环境恶化威胁程度较小,处于健康和可持续发展状态。内蒙古、甘肃、宁夏、青海、河南、山西6省区土地资源生态盈亏指数小于0,土地资源生态压力指数大于1,表明6省区土地资源正遭受不同程度的破坏,存在恶化的风险,处于土地资源不可持续发展状态,其中内蒙古最为严重,生态盈亏指数为-1.57,生态压力指数为1.15。9省区土地资源生态亏损度高、压力指数大,主要是由土地资源生态足迹增长引起的,9省区对土地资源的需求已经超过了流域本身的生产能力。面对这样的土地资源状况,积极恢复生态植被,科学合理规划土地,集约利用土地资源,优化生活消费方式,建立资源节约型的消费体系刻不容缓。



(a) 生态盈亏指数



(a) 2006 年



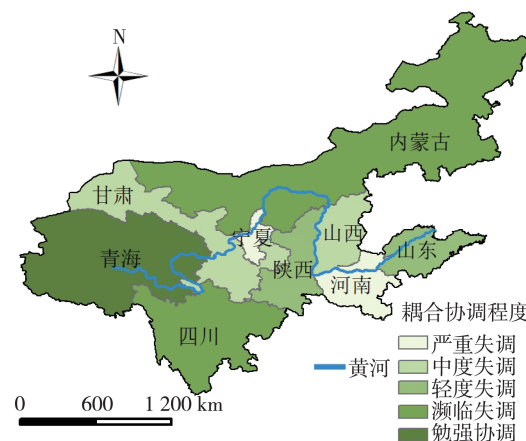
(b) 生态压力指数

图6 黄河沿线9省区土地资源生态盈亏指数与生态压力指数

Fig.6 Ecological profit and loss index and ecological pressure index of land resources in nine provinces

3.3 水土资源生态承载力耦合协调分析

根据式(7)计算出2006年和2020年黄河沿线9省区人均水土资源生态承载力的耦合协调度,反映9省区水土资源协调匹配的变化状况,计算结果如图7所示。2006—2020年各省区水土资源生态承载力耦合协调度不高且差异较大,数值在0.10~0.75之间,处于严重失调到中级协调等级范围内。2006年青海和四川2省处于人均水土资源生态承载力耦合协调状态,四川耦合协调程度最好,达到中级协调;其余7省区均处于失调状态(图7(a))。2020年只有青海为勉强协调状态,其余均为失调状态,河南、宁夏为严重失调状态(图7(b))。总体来看,2006—2020年9省区水土资源耦合协调状况正逐渐变差。四川、河南两省变幅较大,研究期内四川由中级协调转化为濒临失调,河南由濒临失调转化为严重失调。青海、山东2省变幅较小,甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西保持稳定,无耦合协调等级的变化。



(b) 2020 年

图7 9省区水土资源生态承载力耦合协调程度

Fig.7 Coupling coordination degree of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces

对各省区耦合协调状况和水土资源生态足迹与生态承载力综合分析可知,水资源、土地资源两者中的滞后因素是限制协调的关键,找出滞后的因素并对其进行集中整治,遏制水土资源向失调方向发展的趋势,减缓发展速度,是当前促进水土资源良性发展较好的方法。由于黄河沿线9省区跨度范围广,包含省区多,且各省区自然经济条件差异大,因此,可按照省区进行单元化计量,对省区内部水土资源进行协调,进而实现整个流域的协调发展。

宁夏是黄河流域水土资源状况失调的代表省区,水土资源处于严重失调的状态,水资源天然条件劣势突出,水资源承载力具有明显的滞后性,加之经济发展水平和节水意识不强,水资源在需求和耗用上出现不匹配。宁夏当前应坚持以“四水四定”原则为指导,进行种植结构调整和灌溉用水节约化、数字化、信息化管控,提高水资源利用效率;将改善水资源状况为主要任务,弥补短板,促进水土资源协调,进而进行水土两方面的综合调控。四川水土资源耦合协调程度由中级协调到濒临失调,也反映出

水土资源状况正发生变化。结合四川水土资源生态承载力状况进行分析,可以发现四川人均水资源生态承载力状况为9省区中最优,且多年平均变化率呈现增长态势,处于水资源可持续发展状态。而四川人均土地资源生态承载力总体不高,多年平均变化率为-0.69%,属于土地资源滞后性省区。四川土地资源总体上本底状况不佳,水土流失问题突出,后备的土地资源不足且多分布于甘孜、阿坝等生态和地质环境复杂的地区,开发利用难度大。成都平原地区虽然土地资源状况良好,由于经济水平的提高,土地占用问题十分严重,已经威胁到了耕地的质量。虽然黄河流经四川省内面积相对较小,但流经区地势平坦,植被茂盛,水生态系统十分健康,是黄河水源不可缺少的补给地,四川也是“中华水塔”和黄河流域水土资源高效利用与区域高质量发展不可或缺的重要省份^[32]。要保障川西北乃至整个四川省的水土资源协调发展,应坚持节约、集约和高效的土地利用,完善土地资源的平衡、保护和补偿机制。当前9省区水土资源状况不容乐观,经济发展水平和节水意识对区域发展影响很大,9省区要积极推动新模式下的旱作农业,优化能源生产布局,同时完善黄河综合治理体系建设。

3.4 讨论

本文基于黄河沿线9省区水土资源基础数据,在时空尺度上探究了水土资源生态足迹和生态承载力的动态变化,结合水土资源生态承载力耦合协调模型进行分析,揭示了9省区水土资源生态承载力耦合协调状况,可为黄河流域水土资源重点性治理提供一定的理论基础。9省区水土资源总体上处于生态赤字和压力状态下,多数省区水土资源耦合协调性较差,表现出明显的水资源滞后性或土地资源滞后性。本文研究结果与左其亭等^[27]研究得到9省区水资源生态状况具有一致性,与王业宁等^[17]关于内蒙古土地资源生态状况的研究结果和傅春等^[33]关于9省区土地资源生态状况的研究结果总体上相符合,与王丽媛^[25]关于河南省水土资源耦合状况的研究结果具有一致性。水土资源关系密切,从水土资源耦合协调角度将水土资源生态承载力作为一个系统进行分析,相比于对水资源或土地资源单一分析,在黄河流域水土综合整治中实用性更强。

4 结 论

a. 2006—2020年黄河沿线9省区人均水资源生态足迹明显降低,人均水资源生态承载力稳中有升。宁夏、甘肃、内蒙古、山西、河南和山东6省区生态足迹高于生态承载力,处于生态赤字和压力状态。

其中宁夏水资源生态状况最差,由人均水资源生态承载力极低所导致,多年来低于 0.01 hm^2 。

b. 2006—2020年黄河沿线9省区人均土地资源生态足迹与生态承载力均呈现增长的态势。内蒙古、甘肃、宁夏、青海、河南和山西6省区土地资源处于生态亏损状态,存在恶化的风险,其中内蒙古人均土地资源生态足迹最大,达 14.99 hm^2 。

c. 2006—2020年黄河流域水土资源耦合协调状态较差,耦合协调度大多集中在 $0.20 \sim 0.60$,耦合协调程度多属于濒临失调到勉强协调,且逐年变差。四川、青海为协调状态,其余7省区均属于失调状态,宁夏最为严重,处于严重失调状态。

d. 黄河沿线9省区水土资源耗用与经济发展方式密切相关,自然维度因素对水土资源承载状况影响较大,水资源是水土资源耦合协调的薄弱点。综合水土资源生态盈亏指数、压力指数和水土资源耦合协调度反映出黄河沿线9省区水土资源生态状况差,转变经济发展方式和推进水土资源高效利用十分必要。

参考文献:

- [1] 张冉,王义民,畅建霞,等. 基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 274-287. (ZHANG Ran, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Response of land use change to human activities in the Yellow River Basin based on water resources division [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 274-287. (in Chinese))
- [2] 中共中央国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[J]. 中国水利, 2021(21): 3-16. (CPC Central Committee and the State Council. Outline of the plan for ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin [J]. China Water Resources, 2021(21): 3-16. (in Chinese))
- [3] REES W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability [J]. Population and Environment, 1996, 17(3): 195-215.
- [4] WACKERNAGEL M, SCHULZ N B, DEUMLING D, et al. Tracking the ecological overshoot of the human economy [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(14): 9266-9271.
- [5] 张志强,徐中民,程国栋,等. 中国西部12省(区市)的生态足迹[J]. 地理学报, 2001, 56(5): 599-610. (ZHANG Zhiqiang, XU Zhongmin, CHENG Guodong, et al. The ecological footprints of the 12 provinces of West China in 1999 [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(5): 599-610. (in Chinese))
- [6] 陈东景,徐中民,程国栋,等. 中国西北地区的生态足迹

- [J]. 冰川冻土, 2001, 23 (2): 164-169. (CHEN Dongjing, XU Zhongmin, CHENG Guodong, et al. Ecological footprint in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23 (2): 164-169. (in Chinese))
- [7] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55 (5): 607-616. (XU Zhongmin, ZHANG Zhiqiang, CHENG Guodong. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (5): 607-616. (in Chinese))
- [8] EWING B R, HAWKINS T R, WIEDMANN T O, et al. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework [J]. Ecological Indicators, 2012, 23: 1-8.
- [9] 杨一畅, 卢宏伟, 梁东哲, 等. 基于三维生态足迹模型的长江中游城市群平衡性分析与生态补偿研究[J]. 生态学报, 2020, 40 (24): 9011-9022. (YANG Yiyang, LU Hongwei, LIANG Dongzhe, et al. Balance analysis and ecological compensation of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River based on the three-dimensional ecological footprint model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (24): 9011-9022. (in Chinese))
- [10] 王文国, 何明雄, 潘科, 等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26 (9): 1555-1565. (WANG Wenguo, HE Mingxiong, PAN Ke, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan Province [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26 (9): 1555-1565. (in Chinese))
- [11] 夏军, 刁艺璇, 余敦先, 等. 鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (3): 1-8. (XIA Jun, DIAO Yixuan, SHE Dunxian, et al. Analysis on ecological security and ecological carrying capacity of water resources in the Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3): 1-8. (in Chinese))
- [12] 安慧, 范历娟, 吴海林, 等. 基于 BP 神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30 (5): 1076-1087. (AN Hui, FAN Lijuan, WU Hailin, et al. Analysis and prediction of water ecological footprint of Huaihe River Basin based on BP neural network[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30 (5): 1076-1087. (in Chinese))
- [13] 洪思扬, 王红瑞, 朱中凡, 等. 辽宁省水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. 水利经济, 2016, 34 (3): 46-52. (HONG Siyang, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Ecological footprint and carrying capacity of water resources in Liaoning Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34 (3): 46-52. (in Chinese))
- [14] 贾陈忠, 乔扬源, 关格格, 等. 山西省水资源生态足迹时空变化特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26 (2): 370-376. (JIA Chenzhong, QIAO Yangyuan, GUAN Gege, et al. Temporal and spatial variations and the driving factors of water resources ecological footprint in Shanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (2): 370-376. (in Chinese))
- [15] LENZEN M, MURRAY S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia [J]. Ecological Economics, 2001, 37 (2): 229-255.
- [16] 郑艳茹, 郑艳东, 葛京凤, 等. 基于生态足迹模型的河北省土地利用总体规划实施评价[J]. 水土保持研究, 2014, 21 (5): 230-235. (ZHENG Yanru, ZHENG Yandong, GE Jingfeng, et al. Implementation evaluation of the general land use planning of Hebei Province based on the ecological footprint model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21 (5): 230-235. (in Chinese))
- [17] 王业宁, 王豪伟. 近 20 年内蒙古生态足迹与承载力动态研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43 (增刊 1): 218-224. (WANG Yening, WANG Haowei. Assessing the ecological footprint and carrying capacity of Inner Mongolia in recent 20 years [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43 (sup1): 218-224. (in Chinese))
- [18] 李鹏辉, 张茹倩, 徐丽萍. 基于生态足迹的土地资源资产负债核算[J]. 自然资源学报, 2022, 37 (1): 149-165. (LI Penghui, ZHANG Ruqian, XU Liping, et al. Research on land resource asset and liability accounting based on ecological footprint [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37 (1): 149-165. (in Chinese))
- [19] 何淑勤, 郑子成, 孟庆文, 等. 基于生态足迹的雅安市土地生态安全研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17 (6): 118-122. (HE Shuqin, ZHENG Zicheng, MENG Qingwen, et al. Study on land ecological safety based on ecological footprint in Ya'an City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17 (6): 118-122. (in Chinese))
- [20] 王慧亮, 李卓成. 基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 147-152. (WANG Huiliang, LI Zhuocheng. Evaluation of water resources utilization in the Yellow River Basin based on energy water ecological footprint model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 147-152. (in Chinese))
- [21] 左其亭, 吴青松, 姜龙, 等. 黄河流域多尺度区域界定及其应用选择[J]. 水利水运工程学报, 2022 (5): 12-20. (ZUO Qitang, WU Qingsong, JIANG Long, et al. Multi-scale regional definition and its application selection in the Yellow River Basin [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022 (5): 12-20. (in Chinese))
- [22] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28 (3): 1279-1286. (HANG Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. Acta

- Ecologica Sinica, 2008, 28 (3): 1279-1286. (in Chinese))
- [23] 谭秀娟,郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. 生态学报, 2009, 29 (7): 3559-3568. (TAN Xiujuan, ZHENG Qinyu. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (7): 3559-3568. (in Chinese))
- [24] 韩怡. 基于生态足迹的哈大齐区域土地资源可持续利用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [25] 王丽媛. 河南省水土资源承载力时空分异及其耦合特征研究[D]. 开封: 河南大学, 2019.
- [26] 丛晓男. 耦合度模型的形式、性质及在地理学中的若干误用[J]. 经济地理, 2019, 39 (4): 18-25. (CONG Xiaonan. Expression and mathematical property of coupling model, and its misuse in geographical science[J]. Economic Geography, 2019, 39 (4): 18-25. (in Chinese))
- [27] 左其亭,姜龙,冯亚坤,等. 黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 1-8. (ZUO Qiting, JIANG Long, FENG Yakun, et al. Spatiotemporal variation of ecological footprint of water resources in the provinces in the Yellow River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 1-8. (in Chinese))
- [28] 刘某承,李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26 (5): 401-406. (LIU Moucheng, LI Wenhua. Calculation of equivalence factor used in ecological footprint for China and its provinces based on net primary production[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5): 401-406. (in Chinese))
- [29] 刘某承,李文华,谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592-597. (LIU Moucheng, LI Wenhua, XIE Gaodi. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 592-597. (in Chinese))
- [30] 朱晓梅,魏加华,杨海娇,等. 黄河流域城市群水资源利用效率评估及驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 153-159. (ZHU Xiaomei, WEI Jiahua, YANG Haijiao, et al. Evaluation and driving factor analysis of water resources utilization efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 153-159. (in Chinese))
- [31] 杨玉霞,闫莉,韩艳利,等. 基于流域尺度的黄河水生态补偿机制[J]. 水资源保护, 2020, 36 (6): 18-23. (YANG Yuxia, YAN Li, HAN Yanli, et al. Compensation mechanism of the Yellow River water ecology based on watershed scale[J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6): 18-23. (in Chinese))
- [32] 邓辉,何政伟,陈晔,等. 四川盆地大都市边缘区土地利用时空格局模拟: 以资阳市雁江区为例[J]. 地理科学, 2013, 33 (12): 1524-1530. (DENG Hui, HE Zhengwei, CHEN Ye, et al. The land use spatio-temporal pattern simulation in metropolitan fringe of the Sichuan Basin: a case study in Yanjian District, Ziyang City, Sichuan[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33 (12): 1524-1530. (in Chinese))
- [33] 傅春,陈炜,谢珍珍. 中部地区生态足迹的比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (11): 1397-1404. (FU Chun, CHEN Wei, XIE Zhenzhen. A comparative study of the ecological footprint of the central region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(11): 1397-1404. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-11 编辑:施业)

(上接第 69 页)

- [26] 王水寒,邱建秀,王大刚. 1960—2014 年广东省干旱时空演变特征[J]. 热带地理, 2020, 40 (2): 357-366. (WANG Shuihan, QIU Jianxiu, WANG Dagang. Spatio-temporal variation of drought in Guangdong Province from 1960 to 2014[J]. Tropical Geography, 2020, 40 (2): 357-366. (in Chinese))
- [27] 余锐,孙丽颖,张菁,等. 广东大范围持续干旱过程的识别及其环流成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2023 (3): 21-29. (YU Rui, SUN Liying, ZHANG Jing, et al. Identification of large-scale persistent droughts and analysis of circulation causes in Guangdong[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(3): 21-29. (in Chinese))
- [28] 吴志勇,林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2016, 32 (1): 51-56. (WU Zhiyong, LIN Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 51-56. (in Chinese))
- [29] 徐翔宇,刘昀竺,汪党献,等. 干旱灾害风险管理的战略思考[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 1-5. (XU Xiangyu, LIU Yunzhu, WANG Dangxian, et al. Strategic study on drought disaster risk management[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(2): 1-5. (in Chinese))
- [30] 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500-521. (ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500-521. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-07 编辑:施业)