

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.008

西北地区生态干旱脆弱性评估

刘 轩¹, 栗晓玲^{1,2}, 刘雨翰¹, 梁晓萱¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了解西北地区生态干旱脆弱性的空间分布和演变趋势, 从暴露度、敏感性以及影响力三方面提出了生态干旱脆弱性的概念及定量表征方法, 利用熵权法构建生态干旱脆弱性指数, 采用莫兰指数评估脆弱性指数的空间相关性和脆弱性局部空间聚集情况, 分析了西北地区 1985—2014 年的生态干旱脆弱性区域分布、脆弱性程度及趋势。结果表明: 西北地区生态干旱高脆弱区主要分布在天山山脉、青海南部、青海湖附近、甘肃中部、陕北以及陕西中部等地区, 其余地区均处于中等及以下脆弱性等级; 生态干旱脆弱性指数局部空间分布相对聚集, 呈现出“大聚集、小分散”的空间分布格局; 生态干旱脆弱性在研究时段呈现先升高后降低的趋势, 伊犁盆地、吐鲁番盆地和河西走廊地区脆弱性改善效果明显, 但青海南部、陕北等局部地区脆弱性仍有升高趋势, 未来需要加强这些地区的生态保护工作。

关键词: 生态干旱; 脆弱性评估; 熵权法; 莫兰指数; 西北地区

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)03-0065-09

Vulnerability assessment of ecological drought in Northwest China // LIU Xuan¹, SU Xiaoling^{1,2}, LIU Yuhang¹, LIANG Xiaoxuan¹ (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, 712100, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To understand the spatial distribution and evolution trend of ecological drought vulnerability in Northwest China, the concept of ecological drought vulnerability and its quantitative characterization methods were proposed in terms of exposure, sensitivity and impact. Entropy weight method is adopted to develop the ecological drought vulnerability indices. Moran index is adopted to evaluate the correlation of drought vulnerability indices in spatial distribution and accumulation of vulnerability in local space. The regional distribution, vulnerability degree and trend of ecological drought vulnerability in Northwest China during 1985-2014 were analyzed. The results showed that ecological drought highly vulnerable areas in Northwest China were mainly distributed in Tianshan Mountains, southern Qinghai, the area near Qinghai Lake, central Gansu, northern Shaanxi and central Shaanxi, while the rest of the areas are moderate or low vulnerable. The spatial distribution pattern of ecological drought vulnerability index is relatively concentrated, showing a “large aggregation and small dispersion” pattern. Ecological drought vulnerability shows a trend of increasing and then decreasing during the studied period. The ecological drought vulnerability in Yili Basin, Turpan Basin and Hexi Corridor has improved significantly, while that in areas including southern Qinghai and northern Shaanxi still show a trend of increase. The ecological protection works in these areas need to be strengthened in the future.

Key words: ecological drought; vulnerability assessment; entropy weight method; Moran index; Northwest China

在全球气候变暖背景下, 水循环过程加快, 水量平衡遭到破坏, 导致极端气候事件频发, 生态系统更加脆弱。如澳大利亚 2002—2010 年和美国加州

2012—2015 年的千年一遇干旱, 严重影响了生态系统, 并导致巨大的社会经济损失^[1]。近年来生态干旱事件频发, 其灾害风险高、灾情严重, 导致生态干

基金项目: 国家自然科学基金(52079111)

作者简介: 刘轩(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态干旱研究。E-mail: liuxuan1998nwafu@163.com

通信作者: 栗晓玲(1968—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文模拟及水资源规划研究。E-mail: xiaoling@nwafu.edu.cn

旱脆弱性也变高^[1-2]。生态干旱脆弱性评估是控制和缓解生态干旱的重要环节^[3],可为应对气候变化、保护生态环境及减少生态干旱风险提供依据。

干旱的脆弱性评估是近年来国内外研究的热点之一^[4-5]。例如:Safavi 等^[6]选取土地利用、坡度、土壤类型、降水量、蒸发量、平均温度、地下水位、地表水储存以及环境需求等 9 个指标,评价了伊朗 Zayandehrood 河流域的干旱脆弱性;Wilhelmi 等^[7]选用土壤、土地利用、气候以及灌溉条件等 4 个因子,研究了美国内布拉斯加州的农业干旱脆弱性。对于生态干旱来说,其脆弱性反映了受旱地区面对生态干旱所表现出的旱灾承载力大小,这种脆弱性也会将旱灾的影响反馈给自然和人类系统。国外学者已对生态干旱的脆弱性评估提出了研究内容与概念框架。例如:Turner 等^[8]认为脆弱性是承载体暴露于灾害并受到影响的可能性,包括暴露度、敏感性以及恢复能力三方面;Crausbay 等^[9]从暴露度、敏感性以及影响力三方面建立了生态干旱脆弱性的概念框架,并考虑了人类活动的影响。国内对生态干旱脆弱性评估主要通过干旱对各种生态系统的影响开展。例如:伏玉玲等^[10]研究了水分胁迫对羊草草原生态系统光合作用和呼吸作用的影响,发现水分胁迫会降低生态系统的光合生产力,弱化生态系统功能;王春乙等^[11]发现干旱缺水导致农作物大量减产,农业生态系统稳定遭到破坏,据此分析了农业生态干旱的脆弱性;于泉洲等^[12]通过研究湿地生态系统对干旱的响应来表征湿地生态干旱,发现在极端干旱条件下湿地生态干旱导致湿地面积急剧减小,湿地植被种群密度和生物量下降,湿地生态系统愈发脆弱。上述研究并没有遵循统一的生态干旱脆弱性定义,且缺乏对暴露性、敏感性及影响性等脆弱性指数的定量描述^[1],难以指导生态干旱的应对工作。

西北地区是我国重要的生态建设区,也是全球植被变化最敏感的地区之一,覆盖了我国北方约 75% 的沙漠及全部戈壁滩。由于极端气候加剧以及人类对生态环境的破坏,河川径流量减少,荒漠区干旱化程度加快。同时,随着经济社会的发展,工农业发展挤占生态需水,导致生态环境受到破坏,生态系统涵养能力持续下降^[13-14]。对西北地区生态干旱脆弱性进行评估,可为减轻当地生态干旱造成的损失,调整水土资源管理策略提供科学依据。

1 研究区概况与数据

我国西北地区包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆 5 省区,总面积约为 310 万 km²,位于东亚季风气

候、西风带和高原季风气候相互作用和影响的交汇地带。西北地区深居内陆,远离海洋,降水稀少^[15],70% 以上地区降水不足 400 mm;蒸发强烈,多年平均水面蒸发量高达 1000~2600 mm;生态环境脆弱,对全球气候变化极为敏感^[16]。

本文用于计算标准化生态干旱指数 (standardized ecological water deficit index, SEWDI) 的生态缺水量来源于 Jiang 等^[17]的研究成果,空间分辨率均为 1/12° × 1/12°;归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据来自美国国家航空航天局 (NASA) 发布的 NDVI 第三代数据产品 (global inventory modeling and mapping studies NDVI 3 generation, GIMMS NDVI3g),空间分辨率为 1/12° × 1/12°;蒸散发数据来自全球陆地数据同化系统 (global land data assimilation system, GLDAS) 数据集,空间分辨率为 0.25° × 0.25°;植被净初级生产力数据来自陈鹏飞^[18]的研究成果,时间为 1985—2015 年,空间分辨率为 1 km × 1 km,该成果经过验证,精度较高^[19-20]。为保证研究时段一致,上述数据均选取 1985—2014 年逐月数据。土地利用数据来源于资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/default.aspx>) 1990—2015 年每 5 年分期的土地利用数据,先剔除数据中无植被的区域,再根据西北地区干燥度指数^[21-22]的空间分布,将塔里木盆地、准格尔盆地、柴达木盆地、河西走廊等部分极旱区的格点剔除,然后对数据重采样至 1/12° × 1/12° 的分辨率。此外,参考谢高地等^[23]的“中国陆地生态系统单位面积服务价值当量表”,并考虑到研究区实际土地覆被情况以及计算的便捷性,按照土地利用一级分类整理出西北地区的单位土地面积生态系统服务价值当量数据。

2 研究方法

2.1 生态干旱脆弱性的定义及表征指标

基于 Crausbay 等^[9]提出的生态干旱脆弱性评估框架,本文定义生态干旱脆弱性为特定区域受到生态干旱影响而暴露于干旱的潜在风险大小、对干旱响应的强烈程度以及干旱对生态系统服务价值潜在影响的大小,这三方面具体可分别用植被在干旱状态下的暴露度 (E)、敏感性 (S) 和影响力 (A) 3 个指标表征,分别计算各指标对应的权重,即可由指标值和各自权重值得出表征生态干旱脆弱性的综合指数。其中暴露度是指暴露在干旱中的植被所承受的旱灾潜在风险。干旱越严重,暴露于干旱的植被越多,植被承受的干旱风险越大,暴露度越大。本文

改进了前人计算的生态干旱指数,根据指数值计算出生态干旱的频率、历时、烈度,并结合 NDVI 计算暴露度指标。敏感性是指在一定气象水文条件下,特定区域自然植被对生态干旱响应的强烈程度,表现为不同植被适应生态缺水的能力,可用植被水分利用效率(water use efficiency, WUE)反映植被对干旱响应的程度,以植被生态干旱等级发生变化时引起植被 WUE 变化的条件概率来计算敏感性指标。影响力是指一定气候特征下,生态干旱对自然环境和经济社会造成损失的大小,可利用生态系统遭受干旱影响后生态系统服务价值的高低来反映,其中包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务价值,通过计算不同类别生态系统服务价值进而得出影响力。

基于上述定义构建由暴露度、敏感性和影响力 3 个准则层共 11 个指标构成的生态干旱脆弱性评估指标体系如图 1 所示(图中括号中数据为指标权重)。

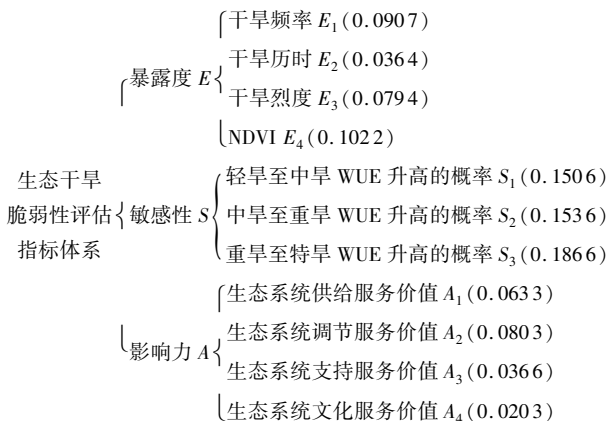


图 1 西北地区生态干旱脆弱性评估指标体系

Fig.1 Evaluation index system of ecological drought vulnerability in Northwest China

采用图 1 的评估指标体系,通过构建 SEWDI 来计算西北地区生态干旱的频率、历时和烈度,结合 NDVI 数据,计算得出生态干旱的暴露度指标;通过 SEWDI 进行干旱等级划分,结合 WUE,计算干旱加剧时 WUE 升高的条件概率,据此得出生态干旱的敏感性指标;根据土地利用数据,可以得出各类生态系统服务价值,计算得出生态干旱的影响力指标。结合上述生态干旱脆弱性的 3 项表征指标,利用熵权法计算出各指标的权重,构建西北地区的生态干旱脆弱性指数(ecological drought vulnerability index, EDVI)并分析 EDVI 的空间自相关性和演变趋势,进而对西北地区生态干旱进行评估。

2.2 SEWDI 的构建

准确量化、评估干旱的基础是构建适宜的干旱指数^[24-25]。由于 SEWDI 选择的分布函数种类较少,

不能很好地综合反映西北地区生态干旱的特性,因此本文在 Jiang 等^[17]的计算基础上选取更多分布函数对生态缺水量(生态需水量和生态耗水量的差值)进行参数化或非参数化拟合(拟合方法详见文献[26]),将生态缺水量累积频率分布转化为标准正态分布,逆标准化求出本文的 SEWDI (new SEWDI, n-SEWDI),计算 1 月时间尺度的 n-SEWDI。采用类似 SPEI 的等级划分,对 n-SEWDI 所描述的生态干旱等级进行划分,即 n-SEWDI 值在 $(+\infty, -0.5]$ 、 $(-0.5, -1.0]$ 、 $(-1.0, -1.5]$ 、 $(-1.5, -2.0]$ 、 $(-2.0, -\infty)$ 时分别表征无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱。

2.3 暴露度指标

暴露度指标由生态干旱的频率 P 、历时 D 、烈度 I 3 个干旱特征指标和 NDVI 构成,由 4 个变量的多年平均值进行熵权叠加计算得到,其中前 3 个变量值根据游程理论^[27]计算。暴露度计算公式如下:

$$E = w_P \bar{P} + w_D \bar{D} + w_I \bar{I} + w_{ND} \bar{I}_{ND} \quad (1)$$

式中: E 为生态干旱暴露度; $\bar{P}$ 、 $\bar{D}$ 、 $\bar{I}$ 分别为生态干旱的频率、历时和烈度的平均值; w_P 、 w_D 、 w_I 分别为生态干旱的频率、历时和烈度对应的权重; $\bar{I}_{ND}$ 、 w_{ND} 分别为研究区多年逐月平均 NDVI 值及其权重。

2.4 敏感性指标

植被 WUE 反映植被对降水和温度变化的响应,因此,植被对干旱的敏感性可以通过生态干旱指数和植被 WUE 之间的关系来反映,WUE 为植被净初级生产力(net primary production, NPP)与实际蒸散发的比值。通常植被发生生态干旱导致气孔开度减小,WUE 升高^[28]。因此可通过分析当干旱加剧时 WUE 升高的条件概率来表征生态干旱的敏感性,将生态干旱分别从轻旱到中旱、中旱到重旱、重旱到特旱 3 种条件下 WUE 升高的概率作为敏感性指标,概率值越大敏感性就越高。条件概率可由 n-SEWDI 和 WUE 的 Copula 函数关系计算得到:

$$\begin{aligned} P_{co}(U_2 > U_1 | I_{min} < I_{SE} \leq I_{max}) = \\ \frac{P(I_{min} < I_{SE} \leq I_{max}, U_2 > U_1)}{P(I_{min} < I_{SE} \leq I_{max})} = \\ 1 - \frac{C(I_{max}, U_1) - C(I_{min}, U_1)}{F_{SE}(I_{max}) - F_{SE}(I_{min})} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: P_{co} 为给定干旱类型转变条件下 WUE 升高的条件概率; U_1 、 U_2 分别为干旱加剧前后的 WUE 值; I_{SE} 为干旱类型发生转变时的 n-SEWDI; I_{min} 、 I_{max} 分别为每个干旱等级中生态干旱指数的下界和上界; $C(I_{SE}, U_1)$ 为 n-SEWDI 和 WUE 的 Copula 函数; F_{SE} 为 n-SEWDI 的边缘分布函数。根据式(2)计算出 3

种条件下 WUE 升高的概率,并将其赋权叠加,得到生态干旱敏感性。

2.5 影响力指标

谢高地等^[23]提出了生态系统服务估计算法以及分类标准,将生态系统服务价值分为 4 大类、11 种服务功能,本文沿用这一标准,分类系统如图 2 所示。

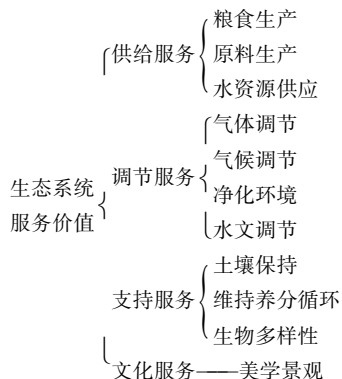


图 2 生态系统服务价值的一级分类与二级分类

Fig. 2 Primary and secondary classification of ecosystem service value

本文基于 1985—2014 年的土地利用类型数据,根据谢高地等^[23]总结的生态系统服务价值估算方法分别计算西北地区各类生态系统服务价值,并将其赋权叠加,得到生态干旱影响力。

2.6 EDVI 的构建

将生态干旱脆弱性视为暴露度、敏感性和影响力的函数,采用极差标准化^[29]对各指标数据进行标准化处理,根据熵权法^[30]计算并确定脆弱性评估指标的权重,结果见图 1。据此构建 EDVI,计算公式如下:

$$E' = \sum_{i=1}^k w_{Ei} Y_{Ei} \quad (3)$$

$$S' = \sum_{i=1}^k w_{Si} Y_{Si} \quad (4)$$

$$A' = \sum_{i=1}^k w_{Ai} Y_{Ai} \quad (5)$$

$$I_{ED} = E' W_E S' W_S A' W_A \quad (6)$$

式中: E' 、 S' 、 A' 分别为标准化处理后生态干旱的暴露度、敏感性、影响力 3 个准则层中各评估指标熵权叠加后的值; Y_{Ei} 、 Y_{Si} 、 Y_{Ai} 分别为 3 个准则层中各评估指标的标准化值; w_{Ei} 、 w_{Si} 、 w_{Ai} 分别为 3 个准则层中各评估指标的熵权; k 为指标总数; I_{ED} 为 EDVI; W_E 、 W_S 、 W_A 分别为 3 个准则层的综合权重。计算出 EDVI 之后,可利用分位数法将其分为不同脆弱性等级来量化生态干旱脆弱性。本文将生态干旱脆弱性划分为微度、轻度、中度、重度、极度 5 个等级,如表 1 所示。

表 1 生态干旱脆弱性等级划分

Table 1 Classification of ecological drought vulnerability levels

等级	暴露度	敏感性	影响力	EDVI
微度	[0.098,0.233)	[0.094,0.295)	[0.017,0.039)	[0.029,0.170)
轻度	[0.233,0.265)	[0.295,0.343)	[0.039,0.042)	[0.170,0.194)
中度	[0.265,0.300)	[0.343,0.386)	[0.042,0.128)	[0.194,0.216)
重度	[0.300,0.339)	[0.386,0.439)	[0.128,0.245)	[0.216,0.241)
极度	[0.339,0.558)	[0.439,0.742)	[0.245,0.710)	[0.241,0.492)

2.7 EDVI 的空间自相关性

全局莫兰指数和局部莫兰指数是研究变量在同一分布区内的观测数据之间潜在相依性的重要指标,用来检验空间数据的相关性^[31]。本文利用全局莫兰指数检验 EDVI 的空间自相关性,以评估 EDVI 在空间上的关联性与整体聚集程度,计算公式为

$$I_{mq} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n w_{ij}} \quad (7)$$

式中: I_{mq} 为全局莫兰指数; S^2 为样本方差; x_i 、 x_j 、 $\bar{x}$ 分别为样本中的元素值和样本均值; w_{ij} 为第 i 行第 j 列元素的空间权重; n 为样本总数。当 $I_{mq} > 0$ 时,表示该空间属性值分布为正相关,空间分布聚集;当 $I_{mq} < 0$ 时,情况相反;当 $I_{mq} = 0$ 时,表示该空间属性随机分布。

采用局部莫兰指数 I_{mj} 分析空间序列的局部聚集状况,计算公式为

$$I_{mj} = \frac{x_j - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (8)$$

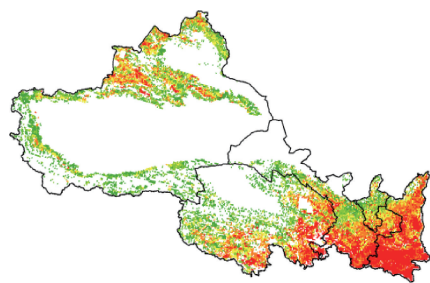
局部莫兰指数取值范围为 $[-1, 1]$,当 $I_{mj} > 0$ 时,表示该区域单元周围为相似的空间集聚,即该区域高(低)值被周围高(低)值包围;当 $I_{mj} < 0$ 时,表示该区域单元周围为非相似的空间集聚,即该区域高(低)值被周围低(高)值包围;当 $I_{mj} = 0$ 时,说明该区域与邻域不存在空间关联关系。

3 结果与分析

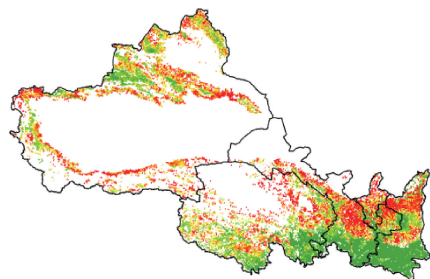
3.1 生态干旱脆弱性等级空间分布

根据表 1 的划分结果,得出西北地区 1985—2014 年生态干旱暴露度、敏感性、影响力及 EDVI 等级空间分布如图 3 所示。

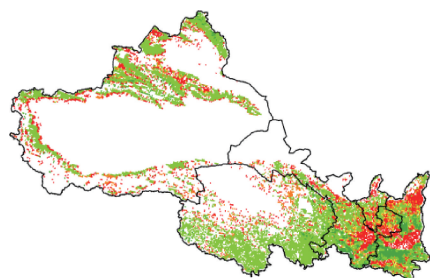
a. 暴露度。从图 3(a)可以看出,西北地区生态干旱暴露度整体呈现从西向东逐渐增大的趋势,其中新疆伊犁盆地、青海湖附近、青海南部、甘肃东南部与陕西大部分地区的植被暴露在生态干旱的区域更集中,暴露度较高。



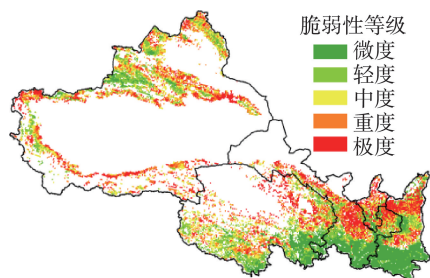
(a) 暴露度



(b) 敏感性



(c) 影响力



(d) EDVI

脆弱性等级
 微度
 轻度
 中度
 重度
 极度

图3 西北地区生态干旱脆弱性等级空间分布
 Fig.3 Spatial distribution of ecological drought vulnerability levels in Northwest China

b. 敏感性。从图3(b)可以看出,西北地区生态干旱敏感性从北到南逐渐降低,尤其在伊犁盆地、青海东南部、甘肃南部以及陕西南部秦岭地区,生态干旱敏感性等级为微度或轻度,因为这些地区的植被以林地为主且分布相对较广,降水量相对较高,气候较为湿润,植被为减少自身水分流失,气孔开度减小,导致自身蒸发蒸腾能力相对较小,因此当植被发生生态干旱时 WUE 很难显著升高,生态干旱敏感性较小;而新疆南部以及甘肃、宁夏和陕西北部地区,植被类型多以草地为主,其对于干旱的敏感性比林地高^[32],且受大陆性气候影响,降水较少,气候干

燥,当生态干旱发生时,WUE 升高概率更大,对生态干旱更为敏感。

c. 影响力。从图3(c)可以看出,西北地区生态干旱影响力等级以轻度为主,秦岭地区为微度,而陕北、关中等地区呈现为重度或极度。从影响力的构成上看,各服务价值类别之间差异较大,例如权重较大的生态系统供给服务和调节服务,其中的粮食生产、原料生产、水资源供应服务价值高值区主要分布于伊犁盆地周边、青海湖附近、青海南部、甘肃南部以及陕西中部和秦岭地区,而气体调节、气候调节、净化环境和水文调节等服务价值除上述植被茂盛的地区较高以外,在西北部分地区例如天山山脉和青海湖周边地区服务价值也较高。权重相对较低的支持服务和文化服务价值,高值区也主要分布于陕西中部和秦岭一带。因此生态系统服务价值高值区主要分布于人口密集区和绿洲等地,表现为生态干旱影响力较低;而荒漠和植被覆盖较少的地区服务价值则较低,生态干旱影响力较高。

d. EDVI。从图3(d)可以发现,西北地区生态干旱高脆弱区域主要分布在天山山脉、青海南部、青海湖附近以及甘肃中部、陕北等地区,其余地区脆弱性均处于中度及以下等级。在生态干旱脆弱性的3个准则层中,暴露度和敏感性权重相对较大,因此高暴露度和高敏感性的地区脆弱性相对较大。

3.2 生态干旱脆弱性的特征分析

3.2.1 EDVI 的空间自相关性

计算结果表明,西北地区 EDVI 全局莫兰指数为 0.387,说明 EDVI 空间分布相对聚集。莫兰指数的 Z 值为 441.49,表明在置信度 95% 的水平下莫兰指数是显著的,即 EDVI 在空间上呈现显著高值聚集和低值聚集现象。

西北地区生态干旱脆弱性的局部空间相关性分布如图4所示。可以看出,西北地区生态干旱脆弱性呈现明显的局部空间集聚现象,高值-高值聚集区

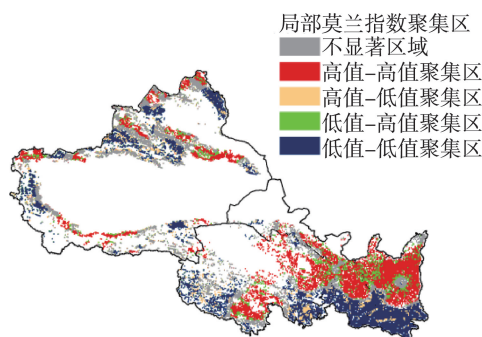


图4 西北地区生态干旱脆弱性局部莫兰指数分析结果

Fig.4 Results of local Moran index analysis of ecological drought vulnerability in Northwest China

主要分布于新疆吐鲁番盆地周边区域、青海中南部、青海湖附近、甘肃中部、宁夏大部以及陕北、关中等地区,表明上述地区生态干旱脆弱性较为严重,可划分为生态干旱高脆弱区;低值-低值聚集区主要分布于新疆伊犁盆地、天山山脉、青海西南和东南部、甘肃南部以及陕西秦岭以南地区,这些区域植被茂盛,生态环境较好,EDVI 较低,可划分为生态干旱低脆弱区。此外,高值-低值聚集区和低值-高值聚集区零星分布于高脆弱区和低脆弱区之中,整体呈现出“大聚集、小分散”的空间分布格局。

3.2.2 生态干旱脆弱性时空趋势分析

以 10 a 为节点将研究时段划分成 3 个时段,图 5 为 3 个时段的生态干旱脆弱性不同等级的面积占比,利用熵权法计算的 3 个时段生态干旱脆弱性等级空间分布如图 6 所示。可以看出,研究时段内西北地区生态干旱脆弱性整体呈先升高后降低的趋势。1985—1994 年生态干旱微度脆弱等级面积占比超过 50%,且主要分布于青海、甘肃以及陕西南部等地区,表明整体生态干旱脆弱性较轻微;而 1995—2004 年微度脆弱等级面积占比下降至 33.8%,极度脆弱等级面积占比从 18.1% 升至 22.9%,其中青海西南部、甘肃南部脆弱性升高程度较大,其他脆弱性等级面积占比也都有不同程度的升高,表明 1995—2004 年由于气候变化以及人类活动影响^[33],生态环境破坏较为严重,生态干旱脆弱性呈现恶化趋势;2005—2014 年生态干旱脆弱性得到初步改善,微度脆弱等级面积占比升至 41.0%,其中伊犁盆地、吐鲁番盆地、河西走廊等地区生态干旱脆弱性改善效果明显,这和我国近年来将生态系统保护和生态安全维护拓展到生态系统结构和功能

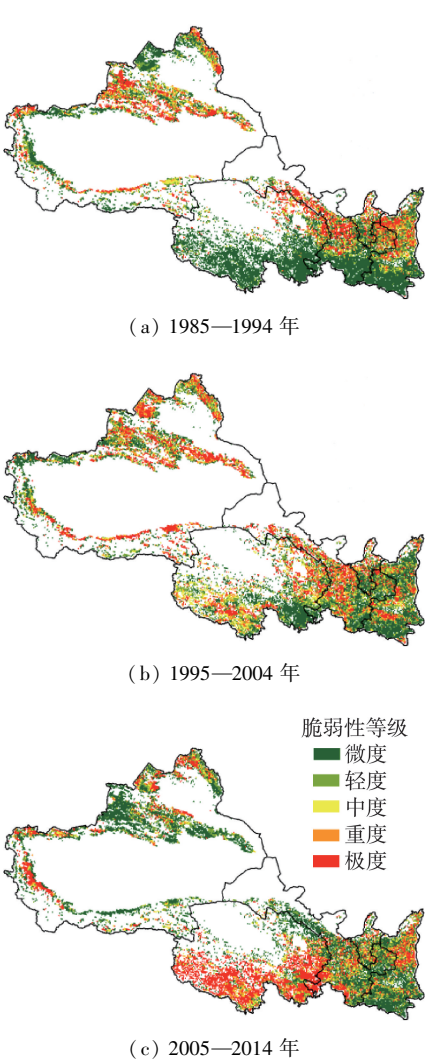


图 6 西北地区不同时段生态干旱脆弱性等级的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of ecological drought vulnerability levels in Northwest China during different periods

健康稳定等方面有关^[34]。此外,2005—2014 年西北地区降水呈增加趋势,气候条件得到改善,更适宜当地植被生长,但极度脆弱等级面积占比仍有小幅上升,从 22.9% 升至 26.6%,说明局部地区生态干旱脆弱性仍有增大趋势,例如青海南部、陕北等地区,因此需要加强这些地区的生态保护工作。

图 7 为西北地区 1985—2014 年生态干旱脆弱性的演变趋势,可以看出:塔里木盆地西侧以及青海南部等地区脆弱性呈上升的趋势,脆弱性增大;而吐鲁番盆地周边、甘肃中部和陕西南部等地脆弱性趋势先增大后减小,得到了初步改善;伊犁盆地、河西走廊等地脆弱性呈减小趋势,生态保护成果显著;而陕北等地脆弱性趋势先减小后增大,说明生态干旱脆弱性降低后又呈现出升高趋势。今后要进一步重视塔里木盆地西侧、青海南部及陕北地区的生态干旱脆弱性问题。

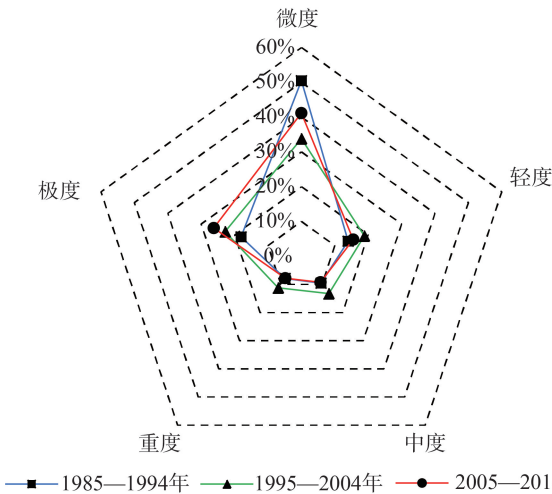


图 5 西北地区不同时段生态干旱脆弱性等级的面积占比
Fig. 5 Area proportion of ecological drought vulnerability levels in Northwest China during different periods

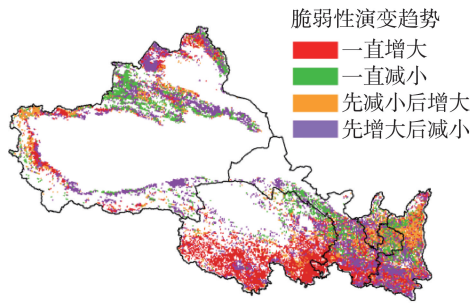


图7 西北地区生态干旱脆弱性演变的空间趋势
Fig.7 Spatial evolution trend of ecological drought vulnerability in Northwest China

4 讨论

上述分析结果表明,西北地区的生态干旱脆弱性存在一定的区域分异性,且不同脆弱性等级空间分布结果和有关西北五省区生态干旱与生态脆弱的相关分区^[13,17]类似,说明本文研究结果是合理的。

a. 从生态干旱暴露度分析,暴露在生态干旱下的区域越集中、植被覆盖的面积越大,暴露度也越大,如青海南部的三江源地区,暴露度从低到高呈现明显差异。肖祖香等^[35]研究结果表明,三江源区西北部和东北部大部分地区的植被覆盖面积呈显著增加趋势,而澜沧江源北部和黄河源西部等部分区域植被呈退化现象,这与本文暴露度呈现出的空间分布一致。

b. 从生态干旱敏感性分析,水资源是影响植被WUE的关键因素^[36]。西北地区普遍处于干旱区和半干旱区,降雨时空分布极不均匀^[37],缺水使得区域内植被对干旱普遍具有较高的敏感性。此外,相关研究表明,我国不同植被类型对干旱的敏感性差异较大,草地敏感性最高,林地次之,耕地最低^[38]。本文研究结果表明,甘肃南部以及秦岭以南地区敏感性较低,而新疆南部以及甘肃、宁夏和陕西北部地区敏感性较高。这一方面与西北地区南部气候湿润、水资源量远高于北部地区有关,另一方面敏感性较低的区域植被类型以林地、耕地为主,而敏感性较高的地区以草地为主,这些结论也与前人的研究结果一致^[38]。

c. 从生态干旱影响力分析,土地利用变化对生态系统服务价值有很大的影响^[39]。本文在计算生态干旱影响力时,分析了研究区的土地利用变化量和变化率,结果表明,草地和未利用地在整个研究期内面积减小,其他土地类型面积增大,其中建设用地面积增大最多。这些土地利用类型所对应的生态系统服务价值也呈现出同样的增减变化。西北地区土

地利用类型整体变化趋势导致生态系统服务价值整体增大,这与家淑珍^[39]的研究一致。

此外,本文研究生态干旱脆弱性的指标主要从气候、植被、土地利用等自然因素中选取,没有考虑社会经济、人口密度等因素,且研究时段受数据所限仅为30 a。今后应收集序列更长、范围更广的数据,并考虑社会经济影响,以便于更全面、准确地评估西北地区生态干旱脆弱性。

5 结论

a. 西北地区生态干旱暴露度整体上呈现从西向东逐渐增大的趋势,敏感性从北到南逐渐降低,影响力整体以轻度影响为主,秦岭地区呈现为微度影响,而陕北、关中等地区呈现重度或极度影响。

b. 西北地区生态干旱高脆弱区主要分布在天山山脉、青海南部、青海湖附近、甘肃中部、陕北以及陕西中部等地区,其余地区脆弱性均处于中度及以下脆弱程度。

c. 西北地区EDVI空间上呈现正相关性,存在正向的相互影响;空间分布相对聚集,高值-高值聚集区和低值-低值聚集区分界明显,整体呈现出“大聚集、小分散”的空间分布格局。

d. 西北地区生态干旱脆弱性在研究时段整体呈先升高后降低趋势,伊犁盆地、吐鲁番盆地和河西走廊地区脆弱性改善效果明显,但塔里木盆地西侧、青海南部、陕北等地区生态干旱脆弱性仍有恶化趋势,未来仍需加强这些地区的生态保护工作。

参考文献:

- [1] 文娟,苟思,刘超,等.生态干旱初探[J].灌溉排水学报,2016,35(增刊1):84-89. (NIU Wenjuan, GOU Si, LIU Chao, et al. Preliminary studies on ecological drought [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(Sup1): 84-89. (in Chinese))
- [2] 粟晓玲,姜田亮,牛纪革.生态干旱的概念及研究进展[J].水资源保护,2021,37(4):15-21. (SU Xiaoling, JIANG Tianliang, NIU Jiping. Concept and research progress of ecological drought [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 15-21. (in Chinese))
- [3] JORDAAN A, BAHTA Y T, PHATUDI-MPHAHLELE B. Ecological vulnerability indicators to drought: case of communal farmers in Eastern Cape, South Africa [J]. Jùmbù: Journal of Disaster Risk Studies, 2019, 11(1): a591.
- [4] MCDOWELL N, ALLEN C D, ANDERSON-TEIXEIRA K, et al. Drivers and mechanisms of tree mortality in moist

- tropical forests[J]. New Phytologist, 2018, 219: 851-869.
- [5] JANSSEN M A, SCHOON M L, WEIMAO K E, et al. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 240-252.
- [6] SAFAVI H R, ESFAHANI M K, ZAMANI A R. Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood River Basin, Iran [J]. Water Resources Management, 2014, 28(6): 1671-1688.
- [7] WILHELM O V, WILHITE D A. Assessing vulnerability to agricultural drought: a Nebraska case study[J]. Natural Hazards, 2002, 25(1): 37-58.
- [8] TURNER B L, KASPERSON R E, MATSON P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [9] CRAUSBAY S D, RAMIREZ A R, CARTER S L, et al. Defining ecological drought for the twenty-first century [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(12): 2543-2550.
- [10] 伏玉玲, 于贵瑞, 王艳芬, 等. 水分胁迫对内蒙古羊草草原生态系统光合和呼吸作用的影响[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2006, 36(增刊1): 183-193. (FU Yuling, YU Guirui, WANG Yanfen, et al. Effects of water stress on photosynthesis and respiration in Inner Mongolia *Leymus chinensis* grassland ecosystem [J]. Science in China; Ser. D Earth Sciences, 2006, 36(Sup1): 183-193. (in Chinese))
- [11] 王春乙, 娄秀荣, 王建林. 中国农业气象灾害对作物产量的影响[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 37-43. (WANG Chunyi, LOU Xiurong, WANG Jianlin. Influence of agricultural meteorological disasters on output of crop in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(5): 37-43. (in Chinese))
- [12] 于泉洲, 刘煜杰, 梁春玲, 等. 基于遥感的南四湖湿地干旱响应特征研究[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1519-1526. (YU Quanzhou, LIU Yujie, LIANG Chunling, et al. Drought response characteristics in the Nansi Lake wetlands based on remote sensing[J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1519-1526. (in Chinese))
- [13] 石三娥. 西北五省生态环境脆弱性时空演变研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [14] 樊琴. 西北五省生态文明发展水平测度及影响因素研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
- [15] 栗晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))
- [16] 皮原月. 西北干旱区极端气候变化及其与大气环流和海表温度的联系[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [17] JIANG Tianliang, SU Xiaoling, SINGH V P, et al. A novel index for ecological drought monitoring based on ecological water deficit [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107804.
- [18] 陈鹏飞. 北纬 18° 以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985—2015) [J]. 全球变化数据学报 (中英文), 2019, 3(1): 34-41. (CHEN Pengfei. Monthly NPP dataset covering China's terrestrial ecosystems at North of 18°N (1985-2015) [J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2019, 3(1): 34-41. (in Chinese))
- [19] LIU Yibo, JU Weimin, HE Honglin, et al. Changes of net primary productivity in China during recent 11 years detected using an ecological model driven by MODIS data [J]. Frontiers of Earth Science, 2013, 7(1): 112-127.
- [20] LIANG Wei, YANG Yuting, FAN Dongmei, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204: 22-36.
- [21] Committee of Physical Regionalization of the Chinese Academy of Science. Synthetic physical regionalization of China [M]. Beijing: Science Press, 1959.
- [22] 柳利利, 韩磊, 韩永贵, 等. 1989—2019 年西北地区干燥度指数时空变化及其对气候因子的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 4050-4058. (LIU Lili, HAN Lei, HAN Yonggui, et al. Spatio-temporal variations of aridity index and its response to climate factors in Northwest China during 1989-2019 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 4050-4058. (in Chinese))
- [23] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. (XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on Per Unit Area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254. (in Chinese))
- [24] 吴志勇, 程丹丹, 何海, 等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 36-45. (in Chinese))
- [25] 袁飞, 章益棋, 刘懿, 等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 46-52. (YUAN Fei, ZHANG Yiqi, LIU Yi, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index [J]. Water Resources Protection,

- 2021,37(1):46-52. (in Chinese))
- [26] 艾启阳,栗晓玲,张更喜,等. 标准化地下水指数法分析黑河中游地下水时空演变规律[J]. 农业工程学报, 2019,35(10):69-74. (AI Qiyang, SU Xiaoling, ZHANG Gengxi, et al. Constructing standardized groundwater index to analyze temporal-spatial evolution of groundwater in middle reaches of Heihe River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (10):69-74. (in Chinese))
- [27] 陶然,张珂. 基于PDSI的1982—2015年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. 水资源保护, 2020,36(5):50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5):50-56. (in Chinese))
- [28] 王庆伟,于大炮,代力民,等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展[J]. 应用生态学报, 2010,21(12):3255-3265. (WANG Qingwei, YU Dapao, DAI Limin, et al. Research progress in water use efficiency of plants under global climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12):3255-3265. (in Chinese))
- [29] 王晨,黄馨,黄晓军. 西北地区城市干旱脆弱性评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019,30(1):114-121. (WANG Chen, HUANG Xin, HUANG Xiaojun. Assessment of urban drought vulnerability of Northwest China[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019,30(1):114-121. (in Chinese))
- [30] DELGADO A, ROMERO I. Environmental conflict analysis using an integrated grey clustering and entropy-weight method: a case study of a mining project in Peru[J]. Environmental Modelling & Software, 2016,77:108-121.
- [31] ORD J K, GETIS A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application[J]. Geographical Analysis, 1995,27(4):286-306.
- [32] 姜田亮,栗晓玲,郭盛明,等. 西北地区植被耗水量的时空变化规律及其对气象干旱的响应[J]. 水利学报, 2021,52(2):229-240. (JIANG Tianliang, SU Xiaoling, GUO Shengming, et al. Spatiotemporal variation of vegetation water consumption and its response to meteorological drought in Northwest China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2):229-240. (in Chinese))
- [33] 李作伟,吴荣军,马玉平. 气候变化和人类活动对三江源地区植被生产力的影响[J]. 冰川冻土, 2016,38(3):804-810. (LI Zuowei, WU Rongjun, MA Yuping. Impact of climate change and human activities on vegetation productivity in the Three-River Headwaters[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016,38(3):804-810. (in Chinese))
- [34] 许静,吴鑫悦,李文龙. 区域尺度生态保护红线分区研究:以我国西北地区为例[J]. 草业科学, 2021,38(7):1218-1230. (XU Jing, WU Xinyue, LI Wenlong. Ecological conservation redline zoning at the regional scale: a case study of Northwest China[J]. Pratacultural Science, 2021,38(7):1218-1230. (in Chinese))
- [35] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(6):515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xian'gang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6):515-520. (in Chinese))
- [36] 张永永,税伟,孙晓瑞,等. 云南省植被水分利用效率时空变化及影响因素[J]. 生态学报, 2022,42(6):2405-2417. (ZHANG Yongyong, SHUI Wei, SUN Xiaorui, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation water use efficiency in Yunnan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6):2405-2417. (in Chinese))
- [37] 李致家,霍文博,张珂. 格林-安普特降雨径流模型改进及初步应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(5):385-391. (LI Zhijia, HUO Wenbo, ZHANG Ke. Improvement and preliminary application of Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5):385-391. (in Chinese))
- [38] 张更喜,栗晓玲,郝丽娜,等. 基于NDVI和scPDSI研究1982—2015年中国植被对干旱的响应[J]. 农业工程学报, 2019,35(20):145-151. (ZHANG Gengxi, SU Xiaoling, HAO Li'na, et al. Response of vegetation to drought based on NDVI and scPDSI data sets from 1982 to 2015 across China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(20):145-151. (in Chinese))
- [39] 家淑珍. 中国西北地区生态系统服务价值的时空变化研究[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2020,34(4):65-71. (JIA Shuzhen. Temporal and spatial variation of ecosystem service value in Northwest China[J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2020,34(4):65-71. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-06 编辑:熊水斌)

