

DOI: 10.20103/j.stxb.202312152737

吉静怡, 赵允格, 王闪闪, 黄琬云, 张万涛. 黄土高原不同降水量带退耕草地生物结皮的斑块特征和分布格局. 生态学报, 2025, 45(3): 1444-1453.
Ji J Y, Zhao Y G, Wang S S, Huang W Y, Zhang W T. Patch characteristics and distribution patterns of biocrusts in rehabilitated grassland under different precipitation zones on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1444-1453.

黄土高原不同降水量带退耕草地生物结皮的斑块特征和分布格局

吉静怡^{1,2,4}, 赵允格^{1,2,3,*}, 王闪闪^{1,2,4}, 黄琬云³, 张万涛³

1 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

3 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 杨凌 712100

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:生物结皮是旱区景观的重要成分, 分布具有明显的空间异质性, 影响其生态功能。然而, 已有研究中生物结皮的分布特征以定性描述为主, 限制了对其生态功能的评估。以黄土高原不同降水量带封禁退耕草地的生物结皮为对象, 通过野外调查和图像处理, 采用景观格局指数量化生物结皮的分布格局, 明确不同降水量带生物结皮的空间分布特征。结果表明, 1) 景观格局指数能够精确地量化生物结皮的分布特征。黄土高原 200—550 mm 降水量带退耕草地的生物结皮盖度变化于 47%—73%, 不同降水量带间生物结皮盖度差异显著。其中, 200—250 mm 降水量带生物结皮平均盖度 (73%) 显著高于 250—550 mm (52%)。2) 不同降水量带生物结皮的分布模式不同。从 200 至 550 mm, 生物结皮的分布模式由基底转变为基底或斑块共存模式, 再进一步转变为斑块模式。3) 生物结皮斑块特征在不同降水量带间差异显著。降水量从 200—250 mm 增至 250—500 mm, 生物结皮斑块数量增加 3 倍, 最大和平均斑块面积降低 42% 和 49%, 斑块形状趋于复杂, 450—500 mm 降水量带生物结皮斑块接近圆形。4) 生物结皮分布格局在不同降水量带差异显著。斑块长度随降水量增大而增加, 破碎加剧。本文首次量化揭示了黄土高原不同降水量带生物结皮的斑块特征和分布格局, 为准确评估生物结皮的生态功能奠定了理论基础, 为旱区生态系统的恢复和管理提供了科学依据。

关键词:生物土壤结皮; 降水梯度; 生态功能; 景观格局; 空间特征; 环境因子; 黄土高原

Patch characteristics and distribution patterns of biocrusts in rehabilitated grassland under different precipitation zones on the Loess Plateau

Ji Jingyi^{1,2,4}, ZHAO Yunge^{1,2,3,*}, WANG Shanshan^{1,2,4}, HUANG Wanyun³, ZHANG Wantao³

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Biological soil crusts (Biocrusts) are important components of dryland ecosystems, playing a crucial role in various ecological functions, including soil stabilization, nutrient cycling, soil moisture retention and preventing soil erosion. They exhibit significant spatial heterogeneity in distribution, which profoundly impacts their ecological functions. However, the distribution characteristics of biocrusts in existing studies are mainly described qualitatively, which limits the

基金项目: 国家自然科学基金 (42377357, 41830758)

收稿日期: 2023-12-15; 网络出版日期: 2024-10-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

comprehensive assessment of their ecological functions. This study focused on biocrusts in rehabilitated grasslands across different precipitation zones of the Loess Plateau, China and aimed to fill this gap by quantifying their distribution characteristics. By conducting field investigations and advanced image processing techniques, we quantified the spatial distribution patterns and characteristics of biocrusts using landscape pattern indices. This approach allowed us to clarify the spatial distribution characteristics of biocrusts across varying precipitation zones, ranging from 200 mm to 550 mm. The results showed that (1) Landscape pattern indices were effective in quantifying the distribution characteristics of biocrusts. Biocrust cover in rehabilitated grasslands on the Loess Plateau varied from 47% to 73% across precipitation zones ranging from 200 to 550 mm. Significant differences were observed between these zones, with the average biocrust cover in the 200—250 mm precipitation zone (73%) significantly higher than in the 250—550 mm precipitation zone (52%). (2) The distribution pattern of biocrusts differed with precipitation zones. As precipitation increased from 200 to 550 mm, the distribution pattern of biocrusts transitioned from a matrix pattern to a coexistence of matrix and patches, and eventually to a patch—dominant pattern. (3) The patch characteristics of biocrust varied significantly among different precipitation zones. As precipitation increased from 200—250 mm to 250—500 mm, the number of biocrust patches tripled. Meanwhile, the largest and mean biocrust patch areas decreased by 42% and 49%, respectively, and the patch shape became more complex. Additionally, biocrust patches in the 450—500 mm precipitation zone tended to be nearly circular compared to other precipitation zones. (4) The distribution characteristics of biocrusts differed significantly across precipitation zones. The length and fragmentation of biocrust patches increased as precipitation increased. This study represents the first quantitative the patch characteristics and distribution patterns of biocrusts in different precipitation zones on the Loess Plateau, China. It provides a theoretical foundation for assessing the ecological functions of biocrusts. Moreover, it offers valuable scientific guidance for the restoration and management of dryland ecosystems, contributing to more effective conservation strategies for biocrusts.

Key Words: biological soil crust; precipitation gradient; ecological function; landscape pattern; spatial characteristics; environmental factor; the Loess Plateau

生物土壤结皮(生物结皮)是干旱半干旱地区重要的生物地被物,是旱区地表景观的重要组成,具有增加土壤养分含量、改善土壤结构及增强土壤抗侵蚀性等生态功能^[1-3]。生物结皮的生态功能与其组成、盖度及分布格局密切相关。尽管生物结皮盖度及组成已有较多研究^[1,4-5],但其分布格局的研究尚薄弱。我们研究发现,生物结皮的分布格局是除盖度、组成外,影响坡面水土流失的又一重要因素^[6],带状格局的生物结皮坡面径流率和泥沙率均显著高于棋盘和随机格局,径流和泥沙分别是后者的 1.25 倍和 1.39 倍,2.47 倍和 7.76 倍^[7]。此外,生物结皮分布格局对地表径流、泥沙的影响还可间接影响其他诸如养分转化与吸收、微生物的数量与分布等生态过程^[8]。因此,明确生物结皮的空间分布格局是解析其影响下生态过程的基础。

生物结皮的分布具有特定规律^[9-10]。例如,古尔班通古特沙漠的研究表明,生物结皮对地貌部位有较强选择性,南部地区呈连续分布,而北部、西部和东部地区则较破碎^[11];黄土高原北部和毛乌素沙地的研究则指出,生物结皮在沙土区连片发育,而在黄土区多呈斑块状分布^[12-14]。然而,由于方法的限制,已有研究关于生物结皮的分布特征的研究除盖度外皆以定性描述为主,难以量化和比较不同研究区的差异。同时,生物结皮的分布格局多在地块和斑块尺度展开^[9-10],缺乏大尺度研究。在气候变化背景下,生物结皮的空间分布有无差异尚不明确,限制了大尺度生物结皮生态功能的评估。

基底—斑块—廊道是构成景观空间结构的基本模式,也是描述景观空间异质性的基础^[15]。已有研究认为生物结皮在景观中多以斑块状分布^[11-12]。但据我们调查,生物结皮的分布模式与研究尺度和区域密切相关。在微小尺度(cm)下,生物结皮可占据整个景观,以基底存在;在中等尺度(dm,m)下,生物结皮既可作为基底,又可与植物、枯落物、裸土等呈斑块状分布;大尺度(km)的地表景观复杂,生物结皮通常以斑块存在。

除尺度外,生物结皮的分布模式还与研究区有关。在自然环境恶劣、植被稀疏地区,生物结皮占据地表主导地位,以基底存在;在降水较好、植被盖度高的地区,生物结皮常以斑块状分布。判断生物结皮在景观中以基底还是斑块存在,明确其分布模式,对分析景观结构的稳定性和生态系统的可持续性具有重要意义^[16]。

景观格局指数是景观生态学中量化表征景观空间结构和分布特征的工具^[17]。这些指数能揭示景观斑块的数目、大小、形状、连通性和分离度等特征,有助于了解研究对象的空间分布模式和特征。我们尝试将景观格局指数应用于生物结皮,并基于黄土丘陵区退耕草地生物结皮的分布特征筛选出代表性景观指数^[18]。然而,该方法仍缺乏大尺度、大规模的野外应用,以验证其不同地区和生态系统中的普适性。因此,本研究以黄土高原不同降水量的典型退耕草地为对象,基于景观生态学原理及方法,采用野外调查和图像处理方法,研究黄土高原不同降水量带退耕草地生物结皮的斑块特征和分布特征,以期准确评估生物结皮的生态功能提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原(33°41′—41°16′N,100°52′—114°33′E)位于中国西北部,横跨青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西和河南七省,海拔 51—5010 m,总面积约 64 万 km²。该区地貌类型有丘陵、高原、阶地、平原、沙漠、干旱草原、土石山地等,其中山区、丘陵区、高原区为主要地貌。黄土高原从东南向西北气候依次为半湿润气候、半干旱气候和干旱气候,冬春寒冷干燥,夏秋炎热多雨,年降水量 150—750 mm,降水分布不均,由东南向西北递减。黄土高原是我国典型的水土流失地区,也是退耕还林的重点区域,据统计,自退耕还林(草)工程实施以来,黄土高原的植被覆盖率从 1999 年的 31.6% 提高到 2020 年的 67.0%^[19]。

1.2 调查方法

1.2.1 样地选择

在黄土高原 200—250、250—350、350—450 mm 和 450—550 mm 的 4 个降水量带(多年平均降水量)分别选择 2—5 个调查点,每个调查点选择 3—5 块退耕撂荒 15 年以上的草地作为研究样地,样地间隔通常大于 3 km,或有大型沟道隔离。在每个样地沿其长度方向设置 3 个 1 m×1 m 的样方,尽可能覆盖广泛的微环境。样方面积大于黄土高原生物结皮的表现面积^[20],可代表样地生物结皮分布特征,样方间距除个别因地形原因略小外,其余均大于 20 m。各调查样点基本情况见表 1。

1.2.2 调查方法和测定指标

样地基本信息:调查并记录每个样地的坡向、坡度和海拔。

地表覆被调查:调查维管束植物的种类,通过 25 点样方法调查植物根基盖度。在样方中采用 photoshop 像素识别获取植被冠层的盖度^[21],具体操作是拍摄每个样方垂直向下的照片,通过选择色彩范围和调整颜色容差来识别植被像素。然后剪除样方内地上部植物,清除生物结皮上伏枯落物后通过拍照法获得生物结皮空间分布影像,在 ArcGIS 10.3 软件通过最大似然分类法识别生物结皮、枯落物、植物及裸土。经检验该方法的 Kappa 系数均值可达 0.95 以上,说明分类结果可信。

景观格局指数:通过 FRAGSTATS 4.2 软件计算 Patch 水平下生物结皮的斑块数量(Number of patches, NP)、最大斑块指数(Largest patch index, LPI)、平均斑块面积(Mean patch area, MPA)、分形维数(Fractal dimension index, FRAC)和近似圆形形状指数(Related circumscribing circle, CIRCLE)表征生物结皮的斑块特征。计算 Class 水平下斑块占景观比例(Percentage of landscape, PLAND)、边缘密度(Edge density, ED)、斑块连结度(Patch cohesion index, COHESION)和破碎度(Splitting index, SPLIT)^[18]表征生物结皮的分布格局。具体计算公式和生态学意义参考邬建国^[15]和 Ji 等^[18]。

生物结皮分布模式:景观生态学中,斑块指内部具有均质性,外部与周围环境或性质不同的空间单元;廊道指景观中与相邻环境不同的线性或带状结构;基底是景观中分布最广、连续性最大的背景结构^[17]。基于

此,将生物结皮盖度和分布连续性作为判断生物结皮分布模式的标准,当样方内生物结皮盖度>50%且分布连续时为基底,反之为斑块。

样地土壤理化属性:用土钻按“S”形采集 0—20 cm 土壤,充分均匀后带回实验室,用马尔文激光粒度仪测定土壤颗粒组成(砂粒(0.05—2 mm)、粉粒(0.002—0.05 mm)及黏粒(<0.002 mm)),采用硫酸重铬酸钾外加热法测定土壤有机质。

表 1 不同降水量带调查样点基本情况

Table 1 Information of investigation sample sites in different precipitation zones

降水量 Precipitation/ mm	调查点 Investigation region	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	土壤 有机质/ (g/kg)	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
200—250	甘肃省靖远县	104°45'48"	36°33'17"	1480	10	8.89	15	59	26
	宁夏省红寺堡县	106°2'32"	37°24'25"	1387	<5	5.35	10	29	61
250—350	甘肃省皋兰县	103°58'23"	36°25'40"	1769	32	10.60	17	64	19
	陕西省定边县	107°54'14"	37°20'3"	1597	12	8.23	13	49	38
350—450	青海省西宁市	101°54'20"	36°33'43"	2338	20	11.25	13	61	26
	甘肃省定西市	104°34'48"	35°34'17"	2050	<5	9.01	18	64	18
	甘肃省庆阳市	107°38'20"	35°57'15"	1374	12	8.98	17	64	19
	山西省偏关县	111°30'34"	37°22'4"	1105	18	7.11	12	52	36
450—550	陕西省延长县	108°13'28"	36°53'34"	1182	10	5.13	16	58	26
	山西省隰县	108°13'31"	36°53'37"	808	16	5.93	16	66	18
	陕西省吴起县	108°13'26"	36°53'32"	1506	25	17.26	17	64	19
	甘肃省天水市	105°39'32"	34°35'0"	1266	22	9.44	20	65	15
	山西省临县	110°47'41"	36°28'28"	1152	20	7.26	16	60	24

土壤有机质和颗粒组成数据为调查点所有样地的平均值

1.3 数据分析

采用 SPSS 25.0 软件进行数据处理和统计分析,对不同降水量带地表覆被盖度(藻结皮、藓结皮、枯落物、裸土、植物冠层和根基)、生物结皮的斑块数量、最大斑块指数、平均斑块面积、分形维数、近圆形形状指数、斑块占景观比例、边缘密度、斑块连结度和分离度进行正态性检验。其中,植物冠层和根基、裸土盖度符合正态分布,枯落物、藻和藓结皮盖度经根号转换后也符合正态分布。生物结皮景观格局指数均不符合正态分布,但经对数和平方根转换后近似正态分布,因此将上述数据按照正态分布处理,对其进行单因素方差分析(ANOVA)和 LSD 多重比较($\alpha=0.05$)。对环境因子与生物结皮景观格局指数进行双尾相关分析($\alpha=0.05, 0.01$)。文内图采用 Origin 2022 绘制,图表中数据均为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 黄土高原不同降水量带退耕草地地表覆被特征

黄土高原不同降水量带退耕草地植被特征如表 2 所示。各地区优势植物群落和盖度在不同降水量带均有差异,茵陈蒿是 200—250 mm 降水量带的优势植物,平均盖度约 35%。小针茅、长芒草、硬质早熟禾和冰草是 250—350 mm 降水量区域的优势植物群落,平均盖度约 41%。350—550 mm 降水量带,铁杆蒿和达乌里胡枝子逐渐成为优势植物群落,平均盖度约 59%(350—450 mm)和 65%(450—550 mm)。随降水量增加,优势植物群落发生更替,植物盖度逐步增加,植物长势变好,植物根基和枯落物盖度亦随之增加。不同降水量带的裸土盖度无显著差异。

整体上,黄土高原退耕草地的藻结皮平均盖度(40.2%)大于藓结皮(16.2%)。4 个降水量带(200—250、250—350、350—450 mm 和 450—550 mm,下同)的藻结皮盖度分别为 63.4%、38.8%、39.8%、31.7%,藓结皮盖度分别为 8.4%、16.9%、16.1%和 19.2%。随降水量增大,藻结皮盖度降低,藓结皮盖度增加。

表 2 不同降水量带调查样点的地表特征

Table 2 Surface characteristics of sample sites in different precipitation zones

调查点 Investigation region	优势植被群落 Dominant vegetation	盖度 Coverage/%					
		藻结皮 Cyanobacterial crust	藓结皮 Moss crust	枯落物 Litter	植物冠层 Plant canopy	植物根基 Plant root	裸土 Bare soil
靖远	茵陈蒿	58.1±12.0ab	7.5±1.2b	4.4±2.6b	35.4±1.3bc	7.7±3.1ef	11.7±0.5a
红寺堡	茵陈蒿	68.7±1.4a	9.2±4.0b	9.5±7.9b	35.1±12.3bc	13.3±3.3def	9.8±4.1a
皋兰	小针茅、猪毛蒿	54.8±9.2ab	11.5±7.0b	5.5±2.9b	26.5±10.0c	11.7±3.7def	16.5±3.7a
定边	长芒草、硬质早熟禾、冰草	22.8±10.1cd	22.2±12.5ab	14.9±6.4ab	56.4±10.1abc	22.0±4.7abcd	18.1±5.1a
西宁	铁杆蒿、长芒草	69.2±9.4a	1.9±1.1b	5.1±2.9b	38.3±9.2bc	11.7±2.2 def	12.2±3.5a
定西	苦苣菜、冰草、茵陈蒿	9.0±2.5d	43.2±15.5a	21.8±11.4ab	73.9±15.1ab	14.6±2.8cde	11.4±2.9a
庆阳	长芒草、铁杆蒿、甘草	44.2±7.7abc	6.6±3.1b	4.6±1.9b	65.4±8.3ab	32.3±4.2a	12.3±1.1a
偏关	冰草、小针茅	36.7±10.9bcd	12.7±5.3b	14.3±4.5ab	59.3±22.4abc	19.7±1.7cd	16.6±3.1a
延长	达乌里胡枝子、茵陈蒿、长芒草	54.8±15.3ab	6.3±4.5b	22.8±11.5ab	24.7±2.2c	4.0±1.1f	12.2±3.5a
隰县	长芒草	48.4±1.7abc	10.9±0.8b	12.0±10.4b	80.4±15.1a	20.6±9.4bcd	8.1±1.9a
吴起	铁杆蒿、达乌里胡枝子、硬质早熟禾、长芒草	14.9±2.9dcd	12.2±5.5b	34.7±7.1a	70.8±1.3ab	24.8±4.2abc	13.4±8.7a
天水	冰草、长芒草、茵陈蒿	9.4±1.3d	43.6±3.8a	5.6±4.7b	73.6±8.7ab	30.8±2.3ab	10.6±0.6a
临县	硬质早熟禾、铁杆蒿、冰草	31.2±10.3bcd	23.0±4.4ab	10.7±6.0b	70.2±10.9ab	17.0±2.4cde	18.1±5.1a

茵陈蒿: *Artemisia capillaries*; 小针茅: *Stipa capillata*; 猪毛蒿: *Artemisia scoparia*; 长芒草: *Stipa bungeana*; 硬质早熟禾: *Poa sphondylodes*; 冰草: *Leynus secalinus*; 铁杆蒿: *Artemisia gmelinii*; 苦苣菜: *Sonchus oleraceus*; 甘草: *Glycyrrhiza uralensis*; 狗娃花: *Heteropappus hispidus*; 达乌里胡枝子: *Lespedeza davurica*; 小写字母代表不同区域差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 黄土高原不同降水量带退耕草地生物结皮的分布模式

通过分析不同降水量带地表生物结皮的景观图发现, 200—250 mm 降水量带, 生物结皮以基底存在 (图 1); 250—450 mm 降水量带生物结皮以基底或斑块模式存在; 在降水量 450—550 mm 区域, 生物结皮主要以斑块模式存在于地表。结合 2.1 节的结果可以发现, 在同一降水量带, 生物结皮的分布模式受植物盖度的影响, 当植物冠层盖度 > 40%, 生物结皮多以斑块存在。

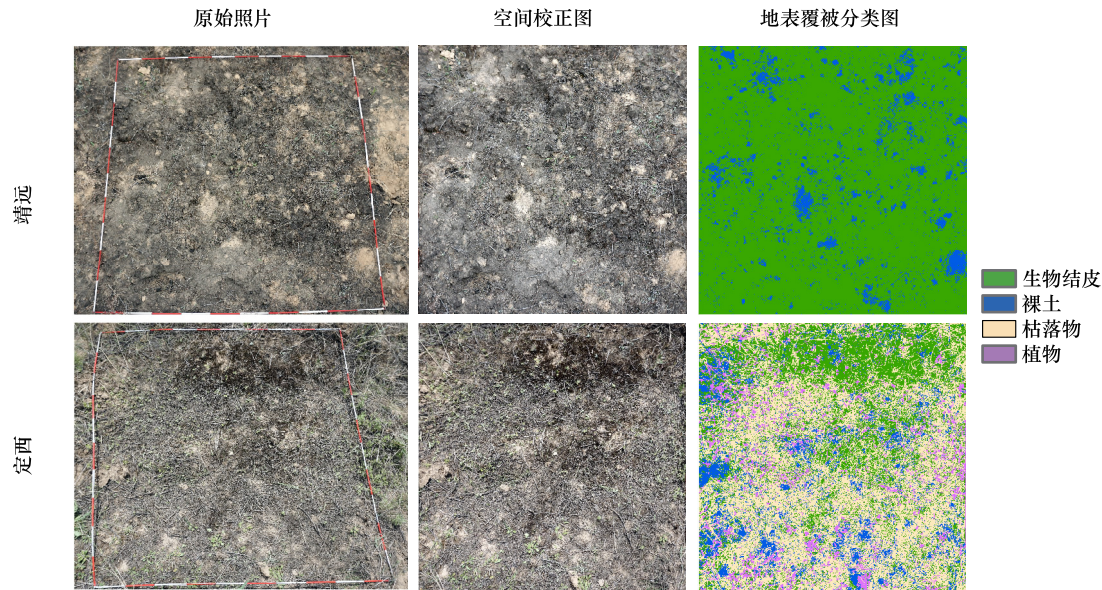


图 1 黄土高原靖远和定西退耕草地生物结皮景观

Fig.1 Biocrusts landscape of rehabilitated grasslands in Jingyuan and Dingxi on the Loess Plateau

图中样方尺寸 1 m×1 m

2.3 黄土高原不同降水量带退耕草地生物结皮的斑块特征

黄土高原不同降水量带的退耕草地生物结皮斑块特征显示,随着降水量增加,生物结皮斑块数量显著增加(图2)。在250—550 mm降水量带内斑块数量无显著差异,但平均斑块数量是200—250 mm降水量带的3倍。最大斑块指数和平均斑块面积的变化趋势相似,200—250 mm降水量带显著高于250—550 mm,分别是后者的1.7倍和2.4倍。值得注意的是,这3个降水量带(250—550 mm)之间在这两项指标上无显著差异。分形维数和近圆形形状指数的变化趋势相似,随着降水量增大,二者均显著增加,表明生物结皮的斑块形状随降水量增加变得复杂。在450—550 mm降水量带中,生物结皮斑块的形状较其他降水量带更接近圆形。

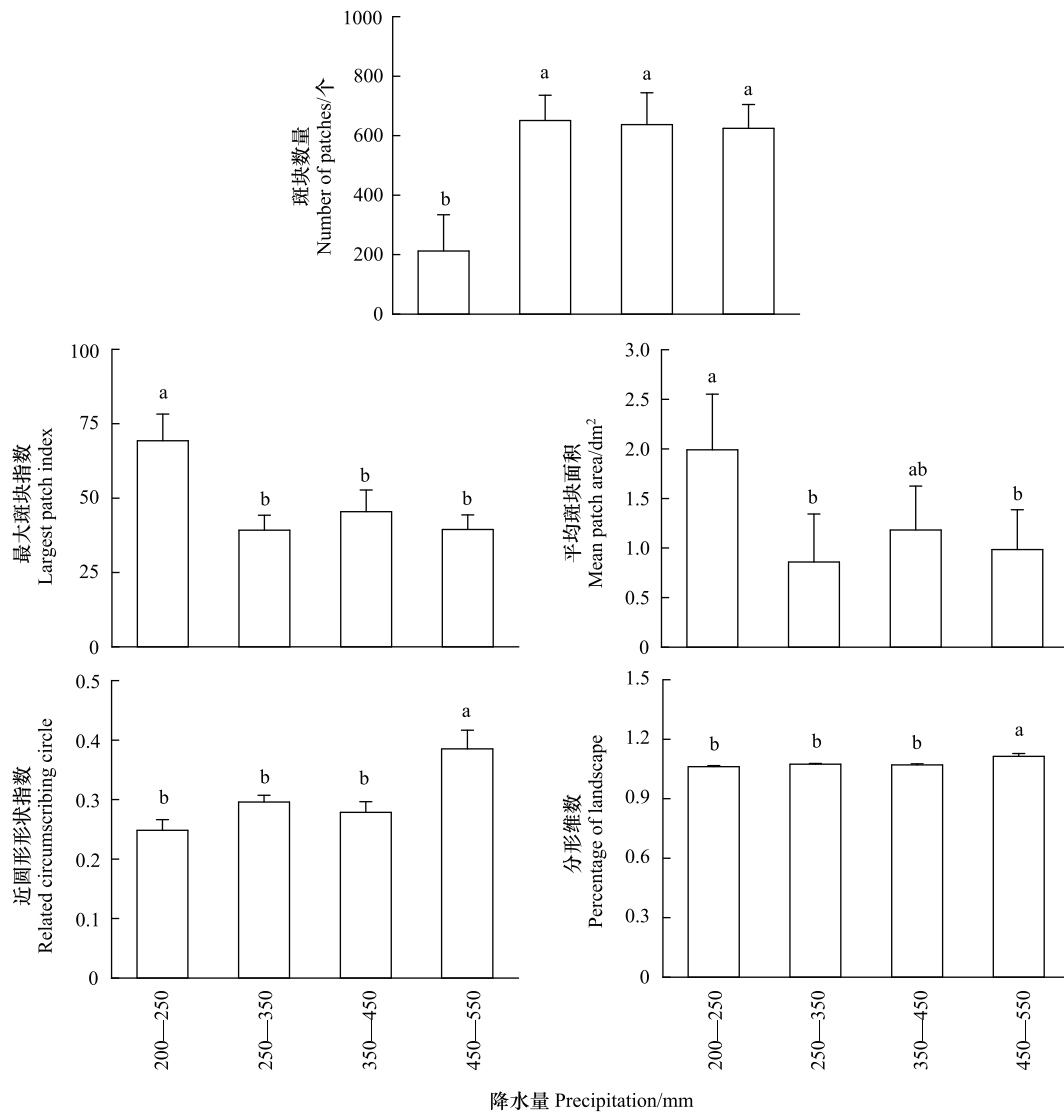


图2 不同降水量带生物结皮的基底和斑块特征

Fig.2 Patch characteristics of biocrusts in different precipitation zones

小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 黄土高原不同降水量带退耕草地生物结皮的分布格局

生物结皮的斑块占景观比例(盖度)见图3,200—250 mm降水量带的生物结皮盖度(73.3%)显著高于250—500 mm降水量带。在250—350 mm、350—450 mm和450—550 mm降水量带中,生物结皮的盖度分别为52.4%、55.8%和47.8%。200—250 mm降水量带生物结皮斑块的边缘密度最低,表明该区域生物结皮斑块以较大尺寸存在,而250—350 mm和450—550 mm降水量带的生物结皮斑块边缘密度最大,表明这些区域的

生物结皮斑块形状较复杂。斑块连结度在不同降水量带之间没有显著差异,但分离度则随降水量增加而显著上升,表明生物结皮斑块破碎程度逐渐加剧。

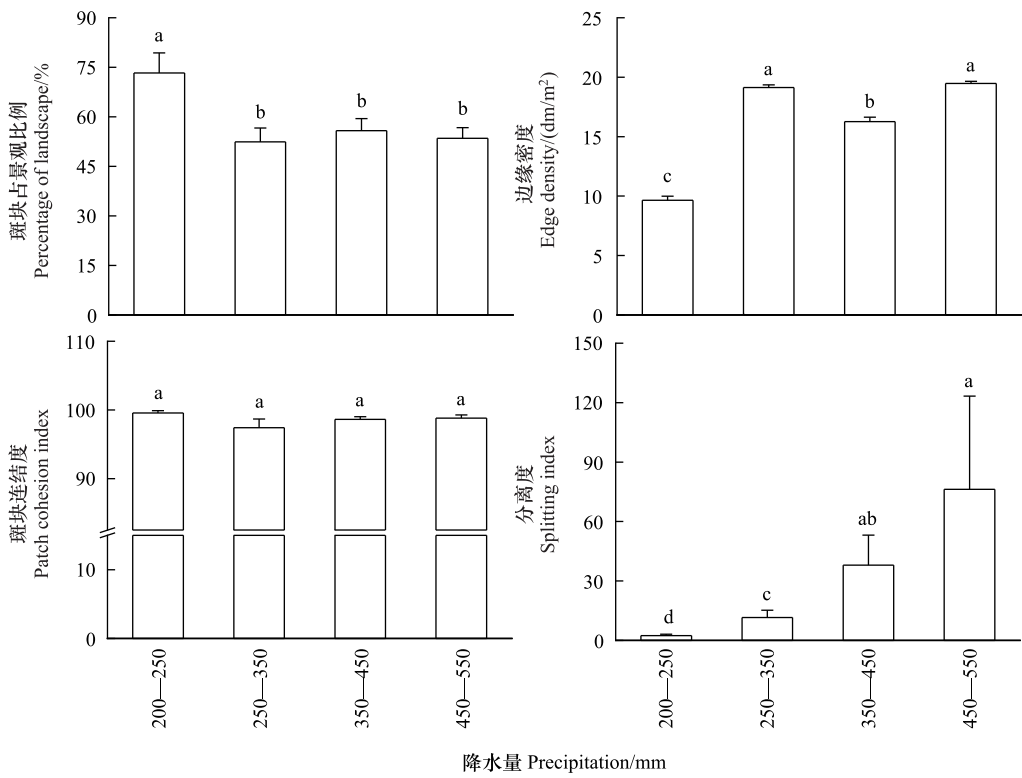


图 3 不同降水量带生物结皮的分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of biocrusts in different precipitation zones

2.5 退耕草地生物结皮空间分布的影响因素

生物结皮斑块特征和分布格局对环境因子的响应不同(表3)。斑块数量(NP)和分形维数(FRAC)与环境因子之间无显著相关关系。最大斑块指数(LPI)和平均斑块面积(MPA)与其他地表覆被盖度呈显著负相关($P<0.05$)。平均斑块面积与降水量呈显著负相关,与海拔则呈显著正相关。近圆形形状指数与海拔呈显著负相关。

表 3 生物结皮景观格局指数与环境因素的相关关系

Table 3 Correlation between landscape pattern index of biocrusts and environmental factors

景观格局指数 Landscape pattern indices	降水量 Precipitation	坡度 Slope	海拔 Altitude	有机质 Soil organic matter	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	盖度 Coverage			
								植物冠层 Plant canopy	植物根基 Plant root	枯落物 Litter	裸土 Bare soil
NP	-0.181	0.098	0.106	0.063	0.017	0.106	-0.089	0.048	0.092	0.105	-0.038
LPI	-0.282	-0.042	0.144	-0.075	0.157	0.130	-0.142	-0.581 **	-0.436 *	-0.660 **	-0.552 **
MPA	-0.354 *	-0.034	0.399 *	-0.045	0.068	-0.111	0.072	-0.414 **	-0.469 *	-0.432 **	-0.468 **
FRAC	0.257	0.100	-0.291	-0.064	-0.278	-0.222	0.245	0.189	0.189	0.197	0.284
CIRCLE	0.317	0.074	-0.342 *	-0.078	-0.299	-0.195	0.229	0.255	0.255	0.245	0.301
PLAND	-0.351 *	-0.119	0.168	-0.112	0.124	0.049	-0.069	-0.565 **	-0.494 **	-0.705 **	-0.457 **
ED	0.193	-0.082	0.138	0.042	-0.017	0.140	-0.108	0.120	0.408 *	-0.098	-0.051
COHESION	-0.036	-0.126	-0.043	0.031	0.119	0.231	-0.214	-0.539 **	-0.186	-0.639 **	-0.286
SPLIT	0.014	0.352 *	-0.010	0.164	-0.062	-0.087	0.085	0.500 **	0.072	0.395 *	-0.033

NP: 斑块数量 Number of patch; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; MPA: 平均斑块面积 Mean patch area; FRAC: 分形维数 Fractal dimension index; CIRCLE: 近似圆形形状指数 Related circumscribing circle; PLAND: 斑块占景观比例 Percentage of landscape; ED: 边缘密度 Edge density; COHESION: 斑块连结度 Patch cohesion index; SPLIT: 破碎度 Splitting index; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

生物结皮斑块占景观比例(PLAND)与降水量呈显著负相关,与其他地表覆被盖度,如植物冠层和根基、枯落物和裸土呈极显著负相关($P < 0.01$)。其中,枯落物盖度是影响生物结皮盖度的主要因素。生物结皮边缘密度(ED)与植物根基盖度呈显著负相关。斑块连结度(COHESION)与植物冠层和枯落物盖度呈极显著负相关关系,而分离度(SPLIT)与植物冠层和枯落物盖度、坡度显著正相关。

3 讨论

黄土高原退耕还林还草工程的实施不仅使植被大面积恢复,也促进了生物结皮的广泛发育。目前,不同区域生物结皮的分布格局研究较少。本文基于景观生态学研究方法和景观格局指数,分析了黄土高原不同降水量带退耕草地生物结皮的斑块特征和分布格局。结果表明,黄土高原不同降水量带退耕草地的生物结皮盖度为47.8%—73.3%,平均盖度约57.3%。随降水量增加,生物结皮盖度降低,藻结皮盖度降低而藓结皮增加,这与已有研究结果一致^[22-23]。虽然王一贺等^[24]调查了黄土高原不同降水量退耕地植被和生物结皮的分布格局,但仅限于生物结皮盖度的研究,未涉及其他分布特征。本研究进一步发现,随降水量增加,生物结皮斑块数量增多、斑块面积减小、形状复杂化、破碎加剧,这可能会影响生物结皮的水土保持功能^[7]。

本文调查结果表明,茵陈蒿、长芒草、铁杆蒿、乌里胡枝子、硬质早熟禾是黄土高原退耕草地的优势植物群落,盖度为24%—81%,平均值54.9%。这与前人的调查结果基本一致^[25],表明本研究中的调查样地能够代表研究区的植物状况。调查区域内,在降水量较少的地区,维管束植物相对稀疏,地表枯落物较少,为生物结皮的发育留下空间^[26]。但随降水量增多,在维管束植物覆盖增加的同时地表枯落物亦随之增多,枯落物覆盖改变了生物结皮的微生境,进一步影响了生物结皮的生长^[27]。

斑块-廊道-基底模式有助于研究景观结构与功能之间的相互关系,便于比较时空动态变化^[18]。作为一种常见的地表覆被,生物结皮有时呈连续分布,有时呈斑块状分布,国内外学者普遍认为其以斑块状存在^[28]。本研究通过对比不同区域的地表特征发现,在同一降水量带内,当植被冠层覆盖超过40%时,生物结皮多呈现斑块状分布。随着降水量增加,生物结皮的分布模式从基底转变为基底或斑块模式共存,甚至完全转变为斑块。需要指出的是,本文未区分藻结皮和藓结皮,而是将生物结皮作为一类景观成分进行研究,若按类型区分,分布模式可能有所不同。此外,为明确自然条件下生物结皮的空间分布特征,本研究选择了干扰较少的封禁样地进行调查。干扰是普遍存在的现象,会导致生物结皮盖度降低、破碎程度增加^[29],分布模式可能会从基底转为斑块。本研究结果证实,景观格局指数不仅适用于描述干扰较少条件下生物结皮的空间分布特征,而且在受干扰的样地上也同样适用^[30-31],表明采用景观格局指数可量化描述生物结皮分布模式。

在应用景观格局指数时,关键是筛选出代表性指标。尽管通过主成分分析和敏感性分析确定了黄土丘陵区生物结皮分布格局的代表性景观指数^[18],但斑块连结度和分离度在描述生物结皮分布格局时敏感性存在差异。在不同降水量带斑块连结度未显示出明显差异,而分离度表现出较高的敏感性(图3)。因此,未来需要进一步研究,以发现新的有效指标,更好地表征生物结皮的空间分布特征。

生物结皮斑块特征和分布格局对环境因子的响应不同。生物结皮的斑块数量和分形维数与环境因子无显著相关关系,表明这些景观格局指数可能更多地受到微环境的影响。最大斑块指数和平均斑块面积与其他地表覆被盖度呈显著负相关,表明随着植被和枯落物盖度增加,生物结皮的连片性和面积会减小。在降水量较高且植物覆盖较多的区域,生物结皮的覆盖度会显著减少。

受多种因素,如降水、温度、土壤和植被及其相互作用影响,生物结皮的空间分布具有明显空间异质性^[32],影响其生态功能的发挥,如水资源(径流)的分配和调节、土壤保持等功能。明确不同尺度、不同气候条件下生物结皮分布模式及格局的差异,是理解生物结皮生态功能的基础,对旱区生物结皮管理及生态系统健康维持具有重要意义。本文基于野外调查和图像分析,首次揭示了黄土高原不同降水量带生物结皮分布模式和格局的特征,并分析了该分布特征与降水、地形(坡度和海拔)及植被盖度间的关系。初步明确了区域自然环境因素对生物结皮分布的影响,但未来仍需要长时间监测和调查,以进一步明确环境因素对生物结皮空

间分布的影响机制。

4 结论

(1) 景观格局指数可以准确量化生物结皮的空间分布特征。

(2) 黄土高原不同降水量带退耕草地生物结皮盖度差异显著, 200—250 mm 降水量带生物结皮盖度显著高于 250—550 mm, 盖度均值为 57.3%。

(3) 地块尺度下生物结皮的分布模式在降水量带 200—250 mm 为基底, 250—450 mm 为基底或斑块, 450—550 mm 为斑块。

(4) 生物结皮斑块特征和分布格局在不同降水量带具有明显空间异质性。降水量从 200—250 mm 增至 250—500 mm, 生物结皮的斑块数量增加 3 倍, 最大斑块和平均斑块面积分别降低 42.0% 和 49.4%、斑块形状趋于复杂化, 逐渐接近圆形, 破碎程度加剧。

参考文献 (References):

- [1] Belnap J, Wilcox B P, Van Scoyoc M W, Phillips S L. Successional stage of biological soil crusts: an accurate indicator of ecohydrological condition. *Ecohydrology*, 2013, 6(3): 474-482.
- [2] 赵允格, 许明祥, 王全九, 邵明安. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1429-1434.
- [3] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望. *地球科学进展*, 2009, 24(1): 11-24.
- [4] Yang K, Zhao Y G, Gao L Q, Sun H, Gu K M. Nonlinear response of hydrodynamic and soil erosive behaviors to biocrust coverage in drylands. *Geoderma*, 2022, 405: 115457.
- [5] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Lazaro R, Solé-Benet A. Cross-scale interactions between surface components and rainfall properties. Non-linearities in the hydrological and erosive behavior of semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 815-825.
- [6] 吉静怡, 赵允格, 杨凯, 张万涛, 高丽倩, 明姣, 王闪闪. 生物结皮分布格局对坡面流水动力特征的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1015-1022.
- [7] 吉静怡, 赵允格, 杨凯, 张万涛, 王闪闪. 黄土丘陵区生物结皮坡面产流产沙与其分布格局的关联. *生态学报*, 2021, 41(4): 1381-1390.
- [8] Baldauf S, Cantón Y, Tietjen B. Biocrusts intensify water redistribution and improve water availability to dryland vegetation: insights from a spatially-explicit ecohydrological model. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1179291.
- [9] Bowker M A, Maestre F T, Mau R L. Diversity and patch-size distributions of biological soil crusts regulate dryland ecosystem multifunctionality. *Ecosystems*, 2013, 16(6): 923-933.
- [10] Eldridge D J, Delgado-Baquerizo M. The influence of climatic legacies on the distribution of dryland biocrust communities. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 327-336.
- [11] 张元明, 陈晋, 王雪芹, 潘惠霞, 辜智慧, 潘伯荣. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征. *地理学报*, 2005, 60(1): 53-60.
- [12] 张军红, 吴波, 贾子毅, 崔利强, 李禾, 张素红, 杨文斌, 高达布希拉图. 毛乌素沙地油蒿植冠下生物结皮分布特征及其影响因素研究. *林业科学研究*, 2010, 23(6): 866-871.
- [13] 卜崇峰, 张朋, 叶菁, 孟杰. 陕北水蚀风蚀交错区小流域苔藓结皮的空间特征及其影响因子. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 490-499.
- [14] Ju M C, Zhang T L, Li X K, Li B Y, Li Y P, Liu Q Y, Wang Q X, Bu C F. Large scale environmental drivers of biocrust distribution and development across a sandy desert in China. *CATENA*, 2021, 200: 105137.
- [15] Wu J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 2004, 19(2): 125-138.
- [16] 陈利顶, 吕一河, 傅伯杰, 卫伟. 基于模式识别的景观格局分析与尺度转换研究框架. *生态学报*, 2006, 26(3): 663-670.
- [17] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 42-52.
- [18] Ji J Y, Zhao Y G, Zhang W T, Gu K M, Li W. Quantitative assessment of biocrust distribution patterns using landscape indices benefits the study of their soil conservation functions. *Geoderma*, 2023, 429: 116257.
- [19] 傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应. *科学通报*, 2022, 67(32): 3768-3779.
- [20] Wang S S, Liu B Y, Zhao Y G, Gao L Q, Yin B, Yang K, Ji J Y. Determination of the representative elementary area (REA) of biocrusts: a case study from the Hilly Loess Plateau Region, China. *Geoderma*, 2022, 406: 115502.
- [21] 陈祖刚, 巴图娜存, 徐芝英, 胡云锋. 基于数码相机的草地植被盖度测量方法对比研究. *草业学报*, 2014, 23(6): 20-27.

- [22] 赵允格, 吉静怡, 张万涛, 明姣, 黄琬云, 高丽倩. 黄土高原生物土壤结皮分布时空分异特征. 应用生态学报, 2024, 35(3): 739-748.
- [23] 赵允格, 许明祥, 王全九, 邵明安. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441-448.
- [24] 王一贺, 赵允格, 李林, 高丽倩, 胡忠旭. 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局. 生态学报, 2016, 36(2): 377-386.
- [25] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 卜耀军, 焦菊英. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2025-2029.
- [26] 张健, 刘国彬, 许明祥, 薛莲, 刘江华. 黄土丘陵区影响生物结皮退化因素的初步研究. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 14-20.
- [27] Serpe M D, Roberts E, Eldridge D J, Rosentreter R. *Bromus tectorum* litter alters photosynthetic characteristics of biological soil crusts from a semiarid shrubland. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 60: 220-230.
- [28] Huang Y J, Li Y G, Zhou X B, Yin B F, Tao Y, Zhang Y M. Moss patch size as a factor profoundly influencing soil nutrient characteristics and multifunctionality of temperate desert in Central Asia. Ecological Indicators, 2023, 155: 110975.
- [29] Zaady E, Eldridge D J, Bowker M A. Effects of local-scale disturbance on biocrusts, in: Weber B, Büdel B, Belnap J. (eds.), Biological Soil Crusts: an Organizing Principle in Drylands, Springer International Publishing, Switzerland, 2016, 429-449.
- [30] 乔羽, 赵允格, 马昕昕, 马宁, 李雯, 孙会, 王鹏. 放牧强度对黄土丘陵沟壑区生物土壤结皮分布格局的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2022, 50(8): 122-130.
- [31] 吉静怡, 赵允格, 张万涛, 谷康民. 黄土丘陵区生物结皮空间分布的代表性景观指数. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1878-1884.
- [32] 张朋, 卜崇峰, 杨永胜, 叶菁, 张晓萍, 石志华. 基于 CCA 的坡面尺度生物结皮空间分布. 生态学报, 2015, 35(16): 5412-5420.