

DOI: 10.11766/trxb202007230412

郭琦, 卜崇峰, 李宜坪, 鞠孟辰, 李亚红, 韦应欣. 区域尺度生物结皮下伏土壤养分的空间分布特征——以毛乌素沙地为例 [J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 699–707.

GUO Qi, BU Chongfeng, LI Yiping, JU Mengcheng, LI Yahong, WEI Yingxin. The Spatial Distribution Characteristics of Soil Nutrients Underlying Biological Crusts at Regional Scale: A Case Study of Mu Us Sandy Land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 699–707.

## 区域尺度生物结皮下伏土壤养分的空间分布特征 ——以毛乌素沙地为例\*

郭琦<sup>1</sup>, 卜崇峰<sup>1, 2†</sup>, 李宜坪<sup>3</sup>, 鞠孟辰<sup>1</sup>, 李亚红<sup>1</sup>, 韦应欣<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 新疆维吾尔自治区自然资源厅, 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 作为旱区广泛分布的活性地被物, 生物结皮下伏土壤对荒漠生态系统的养分循环具有重要影响, 目前有关区域尺度生物结皮下伏土壤养分效应的认识还非常有限。选取覆盖毛乌素沙地全域的 146 个样点, 以地统计学结合多元统计分析方法, 深入探讨了区域尺度上旱区荒漠生物结皮下伏土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 的空间异质性、分布格局及其影响因素。结果表明: 生物结皮提升了荒漠土壤养分含量, 3 种养分含量的变异系数 (CV) 中等, 变异性大小顺序为  $CV_{TP} (60.5\%) > CV_{SOC} (37.9\%) > CV_{TN} (30.8\%)$ ; 不同养分的空间变异特征不同, TP 最佳拟合模型为线性模型, 空间自相关性强烈, SOC、TN 为指数模型, 空间自相关性中等; 受到植被状况、地表水热平衡状况等因素的直接或间接影响, 在区域尺度上生物结皮下伏土壤养分含量在研究区东部较高, 西南部较低; TP 含量自东向西递减, SOC、TN 含量自东向西呈现高-低-高-低的带状分布特点, 二者具有极显著正相关关系 ( $r = 0.818, P < 0.01$ )。

**关键词:** 生物结皮; 毛乌素沙地; 土壤养分; 半方差函数; 空间变异

中图分类号: S153.6 文献标志码: A

## The Spatial Distribution Characteristics of Soil Nutrients Underlying Biological Crusts at Regional Scale: A Case Study of Mu Us Sandy Land

GUO Qi<sup>1</sup>, BU Chongfeng<sup>1, 2†</sup>, LI Yiping<sup>3</sup>, JU Mengcheng<sup>1</sup>, LI Yahong<sup>1</sup>, WEI Yingxin<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Department of Natural Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** 【Objective】As an active ground cover widely distributed in arid areas, biological crusts have an important impact on the nutrient cycle of desert ecosystems. At present, research on the nutrient effects of biological crusts is mostly concentrated on the plot scale. This study explores the spatial characteristics of biological crust nutrients at the regional scale. We aim to provide a reference

\* 国家自然科学基金项目 (41971131)、国家重点研发计划项目 (2017YFC0504703) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41971131), National Key R&D Program Project (No. 2017YFC0504703)

† 通信作者 Corresponding author, E-mail: buchongfeng@163.com

作者简介: 郭琦 (1996—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事生物结皮生态效应研究。E-mail: guoqi3154@nwfufu.edu.cn

收稿日期: 2020-07-23; 收到修改稿日期: 2021-02-20; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-04-23

for research methods on the nutrient characteristics of biological crusts at the regional scale and also provide a scientific evaluation for the ecological value of biological crust in a desert ecosystem. 【Method】The ecological restoration project carried out since 1959 has enabled the vegetation coverage in Mu Us to reach 40–50%, and biological crusts are widely distributed in this area as a sign of sandy land fixation. This study selected 146 sample points that cover the entire Mu Us Sandy land, and used geostatistics combined with multivariate statistical analysis to explore the spatial heterogeneity, distribution pattern and influencing factors of the soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP). 【Result】Biological crusts increased the nutrient content of the desert soil. The autocorrelation range of SOC and TP was relatively large, with variable ranges of 171.83 km and 147.78 km respectively, while the autocorrelation range of TN was relatively small. The nugget coefficients of SOC, TN, and TP were 53.3%, 49.86%, and 20.2%, respectively. SOC and TN exhibited moderately strong spatial autocorrelation, while TP exhibited strong spatial autocorrelation. The content of TP decreased from east to west, whereas the content of SOC and TN presented a high-low-high-low band distribution from east to west. Importantly, the main control variation factors of the three soil nutrients were different. The stepwise regression model of SOC introduced three variables, soil moisture (sm), surface downward shortwave radiation (srad), and normalized vegetation index (NDVI), while the stepwise regression model of TN introduced two variables, average temperature (Tas) and normalized vegetation index (NDVI). Additionally, wind speed (ws) and soil moisture (sm) were introduced into the stepwise regression model of TP as the first and second factors, respectively. 【Conclusion】Biological crusts in the Mu Us sandy land increased the nutrient content of desert soils. Three kinds of nutrient elements (TN, TP and SOC) showed spatial correlation and were directly or indirectly affected by vegetation conditions, surface water and heat balance, and other factors. On a regional scale, the nutrient content of soils under this biological crust was higher in the eastern part of the study area and lower in the southwest.

**Key words:** Biological crust; Mu Us sandy land; Soil nutrients; Semivariance function; Spatial variability

生物结皮 (Biocrusts) 是由苔藓、藻类、地衣以及土壤微生物与表层土壤颗粒通过假根、菌丝体和分泌物胶结形成的复合体, 覆盖了地球陆地面积的 12%, 在低生产率的干旱生态系统中发挥着重要作用<sup>[1-4]</sup>。已有的研究表明生物结皮会对土壤的养分积累过程、微生物群落以及地表微地形等产生影响<sup>[5-9]</sup>。

生物结皮不同组分的固碳、固氮作用积累的养分是旱区生态系统重要的物质输入。然而生物结皮个体矮小, 且不存在真正的根系, 其养分富集效应主要表现在表层土壤。Chamizo 等<sup>[5]</sup>的研究表明, 生物结皮下伏土壤有机碳的含量随生物结皮的发育年限增加, Huang 等<sup>[6]</sup>发现苔藓结皮和藻结皮的固碳速率分别可达  $64.9$  和  $38.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 而藻结皮、地衣结皮的固氮活性可达  $9.81 \times 10^3 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  (以  $\text{C}_2\text{H}_4$  计)<sup>[9]</sup>。目前有关生物结皮养分效应的研究多集中在地块尺度, 鲜有从区域尺度上探讨生物结皮养分空间特征的报告, 阻碍了生物结皮在旱区生态系统中的价值评估。

1959 年以来开展的生态修复工程使毛乌素植被覆盖率达到 40%~50%, 流沙得到有效治理<sup>[10]</sup>, 生物结皮作为流动沙地固定的标志在该区域广泛分布, 2000 年以来在地块尺度的研究表明, 生物结皮在该地区发挥重要的养分富集<sup>[11-12]</sup>、水土保持作

用<sup>[13]</sup>。本文以毛乌素沙地为研究区, 基于全域空间的 146 个样点的样品采集与指标测算, 通过地统计学方法、多元统计方法等, 分析生物结皮下伏土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 含量及其空间异质性, 探讨影响生物结皮下伏土壤养分变化的因素, 旨在为区域尺度生物结皮养分特征的研究方法提供借鉴, 为科学评价生物结皮在荒漠生态系统中的生态价值提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

毛乌素沙地位于陕西省、内蒙古自治区、宁夏回族自治区三省区交汇处 ( $37^{\circ}20' - 39^{\circ}23' \text{N}$ 、 $107^{\circ}20' - 111^{\circ}30' \text{E}$ ), 面积为  $4.22 \text{ 万 km}^2$ , 沙区地表包含多种风沙地貌类型, 固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘广泛分布, 总体地势自西北向东南倾斜, 中西部为梁地与滩地组成的波浪高原, 海拔在  $1300 \sim 1584 \text{ m}$  之间, 中南部地区风沙堆积增厚, 向东南逐渐过渡至黄土高原的梁峁丘陵区, 海拔在  $902 \sim 1300 \text{ m}$  之间。该区域属温带干旱、半干旱的大陆性季风气候, 年平均气温为  $6.0^{\circ}\text{C} \sim 9.0^{\circ}\text{C}$ , 区

域内水热平衡状况自西北向东南表现出有规律的变化：沙区 10℃ 积温在 2 700℃~3 000℃ 之间，由西北向东南逐步增加；潜在蒸散率（PER）由西北的 2.5 mm·a<sup>-1</sup> 递减为东南部的 0.8 mm·a<sup>-1</sup>；太阳辐射总量自西北部的 150 kcal·cm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 减至东南部的 138 kcal·cm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>，年均降水量自西北向东南由 200 mm 递增至 490 mm，7—9 月降水量约占全年降水量的 70% 以上。区域内土壤以风沙土为主，养分含量低、抗侵蚀性能差；植被以沙生植被面积最广，主要包括沙蒿（*Artemisia desertorum* Spreng.）、沙柳（*Salix cheilophila* Schneid.）、柠条（*Caragana korshinskii* Kom.）等，其次为草甸植被，如寸草草甸、芨芨草草甸等。

## 1.2 样品采集与测定

基于 2016—2017 年全域的多次野外调查，布设样点时首先保证其空间代表性和分布均匀性，同时考虑生物结皮分布、样点可到达性等因素，在 2016 年拟定 106 个样点，2017 年增添 40 个样点并完成采样，合计布设 146 个样点（包括 72 个苔藓植物主导的生物结皮样点与 74 个藻类主导的生物结皮样点，图 1）。记录各样点生物结皮的发育类型及其立地条件，通过手持 GPS（Garmin inReach SE+）获取各样点经度、纬度及海拔信息。清除结皮层表面枯落物等杂质后，在 1 m × 1 m 样方内使用微型土钻按五点采样法采取生物结皮下伏 5 cm 层土壤样品，五点混匀后作为 1 个重复，各样点均设置 3 次重复采样。土壤样品装入自封袋带回室内，采用 TOC 分析仪（TOC-L）测

定其土壤有机碳（SOC）含量，全自动间断化学分析仪（CleverChem200）测定全氮（TN）、全磷（TP）含量。

## 1.3 数据处理

选择 IBM SPSS Statistics 23 对生物结皮下伏土壤的 SOC、TN、TP 含量进行经典统计分析。试验所得数据采用样本均值加减三倍标准差（ $\mu \pm 3\sigma$ ）识别特异值，分别用正常的最大值和最小值代替，后续计算均采用处理后的数据。非正态分布的数据及特异值会引起空间变异分析中变异函数的比例效应，导致某些空间机构模糊<sup>[14-15]</sup>，采用 K-S（Kolmogorov-Smirnov）检验法验证数据正态性。

应用 GS+ 9.0 进行空间变异分析及半方差函数分析，建立最佳拟合模型后将其参数导入 ArcGIS 10.3 软件的 Geostatistical Analyst 模块中，采用普通克里格法（Ordinary Kriging）获得毛乌素沙地生物结皮下伏土壤养分的空间分布图<sup>[16-17]</sup>。

通过 R 软件（R-4.0.2）进行生物结皮下伏土壤的养分含量与其可能的影响因子（表 1）间的相关性分析、逐步回归分析，影响因子中的气候因子数据来源于 TerraClimate 数据集<sup>[18]</sup>（1958—2015 年全球月度高空间分辨率（1/24°，~4 km）气候数据集），数据获取地址为 [www.climatologylab.org/datasets.html](http://www.climatologylab.org/datasets.html)；植被因子数据来自美国国家航空航天局（NASA）的地球观测系统 MODIS 数据集，数据通过 <https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov> 获取。

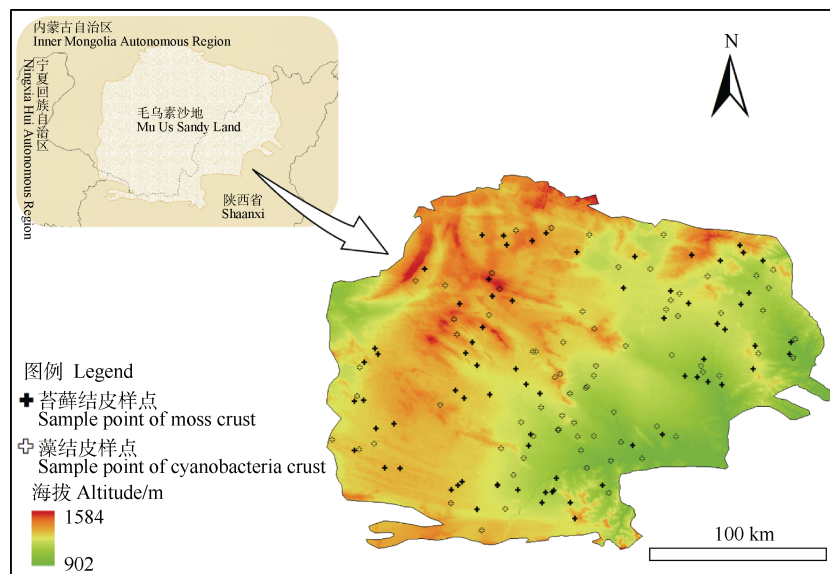


图 1 研究区及样点位置

Fig. 1 Study area and sample location

表 1 解释变量表

Table 1 Table of explanatory variables

解释变量 Explanatory variables	注解 Annotation
风速 Wind speed (ws)	—
降水量 Precipitation (pr)	—
土壤湿度 Soil moisture (sm)	—
平均气温 Mean temperature (Tas)	—
帕默尔干旱指数 Palmer drought severity index (PDSI)	一种基于水量供需关系的干旱指数
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit (vpd)	表示实际空气距离水汽饱和和状态的程度, 即空气的干燥程度
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	评价与分析植被生长、覆盖状况的主要指标之一
潜在蒸散量 Potential evapotranspiration (pet)	指充分供水下垫面蒸发或蒸腾到空气中的水量, 能够反映出—个地区的蒸发能力
地表向下短波辐射 Downward shortwave flux at the surface (srad)	包括直射太阳辐射、大气散射辐射, 是地表能量收支的重要组成部分, 也是光合作用的源驱动力

## 2 结果

### 2.1 生物结皮下伏土壤的养分含量特征

毛乌素沙地生物结皮下伏土壤的 SOC 含量介于  $0.56\sim 20.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, TN 含量在  $0.08\sim 1.66\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, TP 含量在  $0.17\sim 1.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 研究区土壤特殊, 裸沙地 SOC、TN、TP 的平均含量仅为  $0.056\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.003\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.002\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 生物结皮下伏土壤三种养分含量的提升达到极显著水平 ( $P<0.01$ ) (表 2)。若参照全国土壤养分含量分级标准 (表 3), 经换算的 SOC 与 TN 含量均处于中等水平, TP 处于极低水平。变异系数 (CV) 直观地反映出样本数据的变异性大小, 生物结皮下伏土壤养分变异程度以 TP 最大, 其次为 SOC、TN, 变异系数分别为 60.5%、37.9% 和 30.8%, 均属于中等程度变异。数据分析过程中亦发现苔藓结皮下伏土壤养分含量高于藻结皮, 苔藓结皮下伏土壤的 SOC、TN、TP 均值为  $11.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.92\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 藻结皮下伏土壤的 SOC、TN、TP 均值为  $9.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.89\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

正态性检验结果显示, SOC、TN 两组数据的偏度系数分别为  $-0.02$ 、 $-0.16$ , 均表现出一定的左偏态; SOC 数据分布相较正态分布表现为尖顶峰, TN 为平顶峰, 峰度系数分别为  $0.17$ 、 $-0.26$ 。显著性水平

$\alpha=0.05$  的条件下应用 K-S 检验法所得 SOC、TN 的  $P$  均大于  $0.05$ , 表明两组数据均服从正态分布; TP 数据表现右偏态平顶分布, 偏度系数、峰度系数分别为  $0.38$ 、 $-0.88$ , 原数据正态性较差, 经 Box-Cox 转换后的 TP 含量数据服从正态分布。

### 2.2 生物结皮下伏土壤的养分含量空间异质性

地统计学分析结果 (表 4) 表明, 生物结皮下伏土壤 SOC、TN 的最佳半方差函数拟合模型均为指数模型, TP 为线性模型, 其决定系数分别为  $0.816$ 、 $0.742$  和  $0.652$ , 表明各变量的拟合模型能较好地反映其空间分布特征。SOC、TP 的自相关范围较大, 变程分别为  $171.83\text{ km}$  和  $147.78\text{ km}$ , 空间连续性较好; 而 TN 的自相关范围较小, 空间连续性相对较差。生物结皮下伏土壤 SOC、TN、TP 的块金系数分别为  $53.3\%$ 、 $49.86\%$  和  $20.2\%$ , SOC、TN 呈中等强烈的空间自相关性, 且随机因素和结构因素对其空间变异的影响非常接近, TP 表现强烈的空间自相关性, 其空间变异主要由结构性因素引起。

### 2.3 生物结皮下伏土壤的养分空间分布格局

分布规律明显、分布斑块大, 是毛乌素沙地生物结皮下伏土壤养分空间分布的突出特征。三种养分的空间分布插值结果 (图 2) 显示, 研究区生物结皮下伏土壤 SOC 含量在空间上自东向西呈现出高-低-高-低的带状分布特点, 高值区出现在神木市西部、榆林市东北部、乌审旗西部和鄂托克旗东部,

表 2 生物结皮下伏土壤养分的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil nutrients underlying biological crusts

指标 Index / (g·kg <sup>-1</sup> )	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准误差 SD	变异系数 CV/%	偏度 Skew.	峰度 Kurt.	K-S 检验 K-S Test
土壤有机碳 SOC	0.56	20.47	10.51	3.99	37.9	-0.02	0.17	0.08
全氮 TN	0.08	1.66	0.91	0.28	30.8	-0.16	-0.26	0.20
全磷 TP	0.17	1.18	0.48	0.29	60.5	0.38	-0.88	0.13 (Box-Cox)

表 3 全国土壤养分含量分级标准表

Table 3 National soil nutrient content classification standard table

指标 Index	极高 Extremely high	高 High	中上 Upper middle	中 Medium	低 Inferior	极低 Extremely low
SOM / (g·kg <sup>-1</sup> )	>40.00	30.00~40.00	20.00~30.00	10.00~20.00	6.00~10.00	<6.00
TN / (g·kg <sup>-1</sup> )	>2.00	1.50~2.00	1.00~1.50	0.75~1.00	0.50~0.75	<0.50
TP / (g·kg <sup>-1</sup> )	>2.00	1.50~2.00	1.00~1.50	0.75~1.00	0.50~0.75	<0.50

表 4 生物结皮下伏土壤养分变异函数理论模型与相关系数

Table 4 Theoretical model and correlation coefficient of soil nutrient variation function under the biological crust

指标 Index	拟合模型 Fitting model	块金值 Nugget (C <sub>0</sub> )	基台值 Sill (C <sub>0</sub> + C)	块基比 Nugget/ Sill C <sub>0</sub> / (C <sub>0</sub> + C) /%	变程 Range/km	决定系数 R <sup>2</sup>	残差 RSS
土壤有机碳 SOC	指数	9.171	18.35	53.30	171.83	0.816	15.6
全氮 TN	指数	0.056	0.12	49.86	69.33	0.742	9.48×10 <sup>-4</sup>
全磷 (TPBox-Cox)	线性	0.040	0.05	20.20	147.78	0.652	5.48×10 <sup>-5</sup>

位于研究区东部及中西部, SOC 含量在 11.43~20.47 g·kg<sup>-1</sup> 之间, 若参照全国第二次土壤普查养分分级标准, 其 SOC 含量处于缺乏到中等含量水平; 西部及中东部地区为 SOC 含量低值区, 介于 0.56~9.6 g·kg<sup>-1</sup> 之间, 处于极缺乏到缺乏水平, 极低值出现在横山县与榆林市之间、鄂托克前旗东部, TN 与 SOC 含量的空间变化规律基本一致, 反映在二者极显著的相关性上 ( $r=0.818$ ,  $P<0.01$ , 皮尔逊双尾检验), TN 分布以 0.47~1.08 g·kg<sup>-1</sup> 为主, 处于缺乏到中等含量水平。

TP 含量的空间分布异于 SOC、TN 含量的空间分布, 在空间上呈现出带状与块状相结合分布格局, 西南方向出现局部的低值区, TP 含量的高值区出现在研究区东部并向中部延伸, 向南、北两侧其值有降低的趋势。

#### 2.4 生物结皮下伏土壤的养分变异因素

前文从随机因素、结构因素的角度初步揭示了研究区生物结皮下伏土壤养分的变异特征。由于研究区内地形平坦且土壤以风沙土为主, 故本文关注

空间异质性较强的地表水热状况、植被覆盖状况与毛乌素沙地生物结皮下伏土壤养分间的关系, 并使用多元逐步回归的方法筛选主要影响因素。

通过相关系数表 (表 5) 可知, 各气候因子以及植被因子与 SOC、TN、TP 三种土壤养分间的关联程度不同: 3 种土壤养分均与 ws、srad 两种气候因子表现显著的正相关关系 ( $P<0.05$ ), 并且 SOC、TN 与植被因子 NDVI 呈极显著正相关关系 ( $P<0.01$ ); SOC、TN、TP 与 Tas 呈极显著负相关关系 ( $P<0.01$ ), 相关系数分别为 -0.32、-0.28、-0.27; 干旱程度直接影响生物结皮的发育状况, 进而影响其下伏土壤的养分含量, PDSI 亦与 3 种土壤养分呈负相关关系, 但 PDSI 与 TP 间相关性未达到显著性水平。相关分析结果在一定程度上表明了气候因子、植被因子与生物结皮下伏土壤养分间的关系, 同时也反映出解释变量间存在的多重共线性问题, 比如 Tas 与 PDSI、pet、pr、sm、srad 间相关系数分别为 0.55、0.59、0.33、0.45、-0.6, 均达到显著性水平 ( $P<0.05$ )。

为进一步确定气候因子及植被因子对研究区生

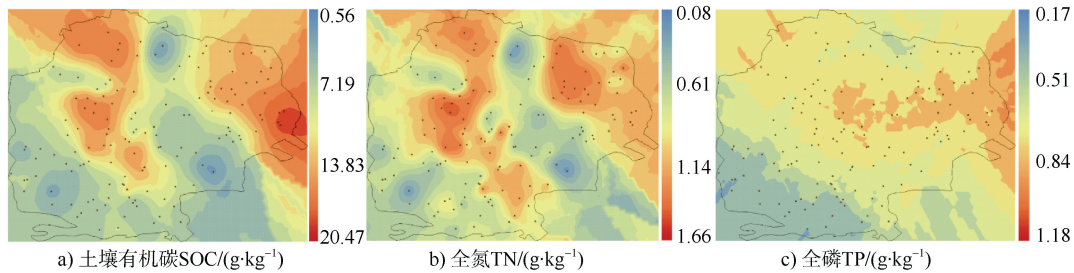


图2 毛乌素沙地生物结皮下伏土壤三种养分的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of biological crust and its underlying soil nutrients in Mu Us Sandland

表5 生物结皮下伏土壤养分与影响因子间的 Pearson 相关性

Table 5 Pearson correlation between soil nutrients underlying biological crusts and influencing factors

环境参数 Environmental parameters	ws	PDSI	pet	pr	sm	srad	Tas	vpd	NDVI	SOC	TN
PDSI	-0.58**										
pet	-0.15**	0.34**									
pr	-0.74**	0.42**	-0.05								
sm	-0.79**	0.42**	-0.17*	0.85**							
srad	0.29**	-0.02	-0.04	0.17*	-0.19*						
Tas	-0.76**	0.55**	0.59**	0.33**	0.45**	-0.6**					
vpd	-0.04	0.18*	0.86**	-0.25**	-0.37**	-0.26**	0.53**				
NDVI	0.02	-0.07	-0.06	0.14	0.08	0.15	-0.11	-0.09			
SOC	0.24**	-0.17*	-0.11	0.01	-0.07	0.3**	-0.32**	-0.14	0.24**		
TN	0.21*	-0.21*	-0.11	-0.04	-0.1	0.23**	-0.28**	-0.13	0.28**	0.82**	
TP	0.2*	-0.13	-0.02	0.08	-0.11	0.33**	-0.27**	-0.05	0.04	0.37**	0.28**

注: \*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ , PDSI、pet、pr、sm、srad、Tas、vpd、NDVI、SOC、TN、TP 分别代表帕默尔干旱指数、潜在蒸散量、降水量、土壤湿度、地表向下短波辐射、平均气温、饱和水汽压差、归一化植被指数、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷。Note: \* means  $P < 0.05$ , \*\* means  $P < 0.01$ , PDSI, pet, pr, sm, srad, Tas, vpd, NDVI, SOC, TN, TP represent palmer drought severity index, potential evapotranspiration, precipitation, soil moisture, downward shortwave flux at the surface, mean temperature, vapor pressure deficit, normalized difference vegetation index, soil organic carbon, soil total nitrogen, soil total phosphorus, respectively.

物结皮下伏土壤 3 种养分变异的贡献, 并处理解释变量间的多重共线性问题, 采用逐步回归的方法分析 SOC、TN、TP 空间变异的主要影响因素, 结果表明 3 种土壤养分的主控变异因素不同: SOC 的逐步回归模型引入了土壤湿度 (sm)、地表向下短波辐射 (srad)、植被归一化指数 (NDVI) 三个变量; TN 的逐步回归模型引入了平均气温 (Tas)、植被归一化指数 (NDVI) 两个变量; 风速 (ws)、土壤湿度 (sm) 分别作为第一和第二因子被引入 TP 的逐步回归模型。气候因子、植被因子对研究区 3 种土壤养分变异的解释能力不同: 对于空间自相关性强烈的 TP, 气候因子、植被因子能解释其空间变异的 38.7%; 对空间自相关性中等的 SOC、TN 的解释率分别为 27.5%、24.1%。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤养分空间分布特征

与目前大多数关于生物结皮养分效应的研究结果相一致<sup>[1-2]</sup>, 本研究也发现生物结皮下伏土壤的养分含量有显著提升。作为荒漠系统碳的主要贡献者, 生物结皮所贡献的有机碳调节了土壤养分的分解和矿化率, 进而调节着养分的有效性和初级生产力<sup>[5]</sup>; Rogers 和 Burns<sup>[19]</sup>发现大约 70%由生物结皮固定的氮素被立即释放到土壤环境中且对周围的维管植物是有效的, 是养分贫瘠的荒漠生态系统中重要的氮素来源之一。磷在土壤中的移动性弱, 且生

物结皮下伏土壤 TP 的主要影响因子同 SOC、TN 不同,使得 TP 显示出高度的变异性。SOC、TN、TP 的空间异质性及其对尺度的依赖程度各不相同,表现在各养分块金系数及变程的不同:与杨之江等<sup>[20]</sup>的研究结果类似,生物结皮下伏土壤 TP 表现出强烈的空间自相关性(块金系数 23.2%),说明样点之间 TP 含量的变化主要受气候、土壤母质等因素控制;随机性因素对 SOC、TN 含量的影响削弱了结构性因素造成的影响,二者的空间异质性均为中等水平,这可能是由于生物结皮对 C、N、P 三种元素的富集能力不同,闫德仁等<sup>[21]</sup>在对库布齐沙漠生物结皮“肥岛效应”的研究结果中发现与沙土相比,生物结皮层全氮、有机质、全磷分别提高了 77.8%、55.4%、19.9%,在黄土区的研究<sup>[22]</sup>也表明生物结皮对土壤 C、N 含量的影响要强于对 P 含量的影响。

### 3.2 土壤养分空间分布的影响因素

部分研究指出,沙地生物结皮的形成在时间序列上是逐渐由物理结皮发育成生物结皮,植物冠层为下层土壤提供更多的凋落物,拦截更多的土壤微细颗粒,有利于土壤结皮的形成,另一方面维管植物提供遮荫改变地表微环境,如温度、湿度、光照强度等,为生物结皮的拓殖、演替以及养分积累过程提供了适宜的环境<sup>[23-24]</sup>。本文的研究结果也证实了这一点:生物结皮下伏土壤 3 种养分的高值区在研究区东部的榆林市、神木市出现重合,SOC、TN 与植被因子(NDVI)呈显著相关关系,且 SOC、TN 的逐步回归模型均引入了 NDVI 作为参数,表明这两种土壤养分的分布格局与植被覆盖状况关系密切。

除植被因子以外,土壤湿度(sm)、地表向下短波辐射(srad)分别作为第一因子和第二因子引入至 SOC 的逐步回归模型,这两种气候因子在研究区东部均为高值,西部(西南部)为低值,与 SOC 表现类似的分布状况。一方面,sm 与 srad 通过影响生物结皮的生长发育状况进而对土壤有机碳的输入量造成影响:srad 作为生物结皮光合作用的源驱动能力,是限制其生长发育的关键因子;Li 等<sup>[25]</sup>在中国北方不同降水梯度下的研究表明,生物结皮表层 SOC 含量与年均降水量、土壤湿度变化趋势类似,但是在本文的分析结果中,3 种养分的逐步回归模型均未引入降水量(pr)作为参数,这是因为生物结皮的发育主要受近地面空气湿度影响<sup>[26]</sup>,相较于降水量而言,土壤湿度对于生物结皮发育的影响更

为显著。另一方面,适宜的水热条件有利于土壤微生物的生长繁殖<sup>[27]</sup>,进而对 SOC 组分中的微生物量碳产生影响。TN 的逐步回归模型在植被因子以外还引入了 Tas,回归系数为-0.149,这是因为高温不利于苔藓植物生长,这一点在多数生物结皮的培育恢复试验<sup>[28-29]</sup>中已经得到了证实。

研究区生物结皮下伏土壤 SOC、TN 的空间分布相似且极显著相关。这可能与碳氮耦合作用有关,生物结皮中的苔藓植物、光合自养微生物在演替发育过程改变土壤环境条件如水分、空气、温度等,为土壤微生物提供了适宜的生长环境<sup>[8-30]</sup>,其中的固氮微生物将大气中的氮气还原成氨,过程中消耗光合作用所提供的能量。李嵘和常瑞英<sup>[31]</sup>的研究发现氮素积累过程会抑制参与土壤碳循环的过氧化物酶、淀粉酶等酶的活性,从而增加土壤碳积累,蔡玉婷等<sup>[32]</sup>的研究表明氮素添加条件下土壤有酸化的风险,从而抑制土壤微生物的生长及其对土壤碳的分解。SOC、TN 在研究区中东部出现条带状的低值区,这很可能受到了生物结皮类型的影响,从样点分布图(图 1)可以看出,在研究区中东部设置的采样点以藻类主导的生物结皮为主,本文的研究结果表明苔藓结皮下伏土壤养分的平均含量高于藻结皮,与目前对于不同类型生物结皮养分富集能力的研究结果相一致<sup>[33-34]</sup>。

与 SOC、TN 不同,TP 含量在研究区内表现出自东向西递减的趋势,其逐步回归模型分别将风速(ws)、土壤湿度(sm)作为第一因子和第二因子引入,回归系数分别为 1.127、-0.059。土壤磷的扩散系数随含水量的增加而增加,而风速对研究区的大气降尘量造成影响,生物结皮(尤其是苔藓结皮)形体结构特殊,表面粗糙度大<sup>[35]</sup>,能够捕获大气降尘中的颗粒物使得磷素输入,闫德仁等<sup>[36]</sup>对风沙环境下苔藓结皮层化学元素组成的研究中发现,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>在结皮层的含量明显高于对照风沙土。此外,在调查采样过程中发现,研究区西部、西南部(内蒙古自治区、榆林市靖边县)的牧场数量较多且规模大,放牧导致土壤中钾素升高,促进草本植物生长,有可能消耗生物结皮所固定的有限的磷素,研究区内生物结皮下伏土壤养分对于干扰现象的响应有待于进一步的研究。

## 4 结 论

毛乌素沙地生物结皮提升了荒漠土壤养分含

量, 三种养分要素均表现出明显的空间相关性, 经 Box-Cox 变化后的 TP 含量表现出强烈的空间相关性。不同的拟合模型很好地反应了研究区生物结皮下伏土壤养分含量的空间特征, 研究区生物结皮下伏土壤 SOC、TN 含量最佳拟合模型为指数模型, 变程分别为 171.83 km、69.33 km, 决定系数分别为 0.816、0.742; TP 为线性模型, 变程为 147.8 km, 决定系数为 0.652。生物结皮下伏土壤养分在研究区的分布状况受到植被恢复状况与地表水热状况等因素的影响, 三种养分在东部均表现为高值, 其中 TP 含量自东向西表现递减的趋势; SOC、TN 自东向西表现高-低-高-低的带状分布特点。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Housman D C, Powers H H, Collins A D, et al. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66 ( 4 ): 620—634.
- [ 2 ] Bu C F, Wu S F, Xie Y S, et al. The study of biological soil crusts: Hotspots and prospects[J]. *Clean - Soil Air Water*, 2013, 41 ( 9 ): 899—906.
- [ 3 ] Rodriguez-Caballero E, Belnap J, Büdel B, et al. Dryland photoautotrophic soil surface communities endangered by global change[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11 ( 3 ): 185—189.
- [ 4 ] Xiao B, Bowker M A. Moss-biocrusts strongly decrease soil surface albedo, altering land-surface energy balance in a dryland ecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140425.
- [ 5 ] Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49 ( 2 ): 96—105.
- [ 6 ] Huang L, Zhang Z S, Li X R. Carbon fixation and its influence factors of biological soil crusts in a revegetated area of the Tengger Desert, Northern China[J]. *Journal of Arid Land*, 2014, 6 ( 6 ): 725—734.
- [ 7 ] Su Y G, Chen Y W, Padilla F M, et al. The influence of biocrusts on the spatial pattern of soil bacterial communities: A case study at landscape and slope scales[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107721.
- [ 8 ] Qi J H, Liu Y B, Li X R, et al. AMF diversity analysis of lichen and moss biocrusts in Shapotou region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 ( 4 ): 986—994. [漆婧华, 刘玉冰, 李新荣, 等. 沙坡头地区地衣和藓类结皮丛枝菌根真菌多样性研究[J]. *土壤学报*, 2020, 57 ( 4 ): 986—994.]
- [ 9 ] Wu N, Zhang Y M, Wang H L, et al. On the nitrogen fixation by biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, northern Xinjiang of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 ( 9 ): 3785—3793. [吴楠, 张元明, 王红玲, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮固氮活性[J]. *生态学报*, 2007, 27 ( 9 ): 3785—3793.]
- [ 10 ] Wu B, Ci L J. Temporal and spatial patterns of landscape in the Mu Us Sandland, Northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 ( 2 ): 191—196. [吴波, 慈龙骏. 毛乌素沙地景观格局变化研究[J]. *生态学报*, 2001, 21 ( 2 ): 191—196.]
- [ 11 ] Dong J W, Li Y P, Li X K, et al. Effects of vegetation types on biocrusts and the underlying soil nutrients in Mu Us Sandland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 ( 2 ): 112—117. [董金伟, 李宜坪, 李新凯, 等. 毛乌素沙地植被类型对生物结皮及其下伏土壤养分的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26 ( 2 ): 112—117.]
- [ 12 ] Yang J Z, Bu C F, Zhang X C. Primary study on development characteristics of biological soil crust in Mu Us Sandy Land in Northern Shaanxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 ( 6 ): 162—165, 189. [杨建振, 卜崇峰, 张兴昌. 陕北毛乌素沙地生物结皮发育特征的初步研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23 ( 6 ): 162—165, 189.]
- [ 13 ] Yuan S P, Zhang Z S, Dang T H, et al. Comparative study of growth status of three plant measures and its ecological functions in Photovoltaic Power Station of Mu Us Sandy Land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 ( 2 ): 235—239. [苑森朋, 张振师, 党廷辉, 等. 毛乌素沙地光伏电站 3 种植物措施生长发育状况及其生态功能比较[J]. *水土保持研究*, 2018, 25 ( 2 ): 235—239.]
- [ 14 ] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties[J]. *Advances in Agronomy*, 1986, 38 ( 1 ): 45—94.
- [ 15 ] Long J, Zhang L M, Shen J Q, et al. Spatial interpolation of soil organic matter in farmlands in areas complex in landform[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 ( 6 ): 1270—1281. [龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51 ( 6 ): 1270—1281.]
- [ 16 ] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89 ( 1/2 ): 1—45.
- [ 17 ] Qiao X J, Shi J C, Tan L L, et al. Multi-scale spatial distribution characteristics of soil salinity in root-zone in film-mulched drip-irrigated cotton fields in Anjihai Irrigation Zone, Xinjiang[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 8 ( 5 ): 1202—1213. [乔学瑾, 石建初, 谭丽丽, 等. 新疆安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤盐分多尺度空间分布特征[J]. *土壤学报*, 2021, 8 ( 5 ): 1202—1213.]
- [ 18 ] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, et al. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958—2015[J]. *Scientific Data*, 2018, 5 ( 1 ): 170191.



- [ 19 ] Rogers S L, Burns R G. Changes in aggregate stability, nutrient status, indigenous microbial populations, and seedling emergence, following inoculation of soil with *Nostoc muscorum*[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 18 ( 3 ): 209—215.
- [ 20 ] Yang Z J, Chen X M, Jing F, et al. Spatial variability of nutrients and heavy metals in paddy field soils based on GIS and Geostatistics[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 ( 6 ): 1893—1901. [杨之江, 陈效民, 景峰, 等. 基于 GIS 和地统计学的稻田土壤养分与重金属空间变异[J]. *应用生态学报*, 2018, 29 ( 6 ): 1893—1901.]
- [ 21 ] Yan D R, Huang H G, Zhang S N, et al. Nutrients and particle composition characteristics in moss biological crusts[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32 ( 10 ): 111—116. [闫德仁, 黄海广, 张胜男, 等. 沙漠苔藓生物结皮层养分及颗粒组成特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32 ( 10 ): 111—116.]
- [ 22 ] Gao L Q, Zhao Y G, Xu M X, et al. The effects of biological soil crust succession on soil ecological stoichiometry characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 ( 2 ): 678—688. [高丽倩, 赵允格, 许明祥, 等. 生物土壤结皮交替对土壤生态化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38 ( 2 ): 678—688.]
- [ 23 ] Li X R, Wang X P, Li T, et al. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35 ( 3 ): 147—154.
- [ 24 ] Bu C F, Zhang P, Ye Q, et al. Spatial characteristics of moss-dominated soil crust and its impact factors in small watershed in wind-water erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29 ( 3 ): 490—499. [卜崇峰, 张朋, 叶菁, 等. 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素[J]. *自然资源学报*, 2014, 29 ( 3 ): 490—499.]
- [ 25 ] Li X R, Song G, Hui R, et al. Precipitation and topsoil attributes determine the species diversity and distribution patterns of crustal communities in desert ecosystems[J]. *Plant and Soil*, 2017, 420 ( 1/2 ): 163—175.
- [ 26 ] Liu L C, Li S Z, Duan Z H, et al. Effects of microbiotic crusts on dew deposition in the restored vegetation area at Shapotou, northwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328 ( 1/2 ): 331—337.
- [ 27 ] Cao H C, Chen R R, Wang L B, et al. Soil pH, total phosphorus, climate and distance are the major factors influencing microbial activity at a regional spatial scale[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25815.
- [ 28 ] Tian G Q, Bai X L, Xu J, et al. Experimental studies on the natural restoration and the artificial culture of the moss crusts on fixed dunes in the tengger desert, China[J]. *Frontiers of Biology in China*, 2006, 1 ( 1 ): 13—17.
- [ 29 ] Yang Y S, Feng W, Yuan F, et al. Key influential factors of rapid cultivation of moss crusts on Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 ( 4 ): 289—294, 299. [杨永胜, 冯伟, 袁方, 等. 快速培育黄土高原苔藓结皮的关键影响因素[J]. *水土保持学报*, 2015, 29 ( 4 ): 289—294, 299.]
- [ 30 ] Wu L, Zhang G K, Chen X G, et al. Development and succession of biological soil crusts and the changes of microbial biomasses[J]. *Environmental Science*, 2014, 35 ( 4 ): 1479—1485. [吴丽, 张高科, 陈晓国, 等. 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化[J]. *环境科学*, 2014, 35 ( 4 ): 1479—1485.]
- [ 31 ] Li R, Chang R Y. Effects of external nitrogen additions on soil organic carbon dynamics and the mechanism[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39 ( 10 ): 1012—1020. [李嵘, 常瑞英. 土壤有机碳对外源氮添加的响应及其机制[J]. *植物生态学报*, 2015, 39 ( 10 ): 1012—1020.]
- [ 32 ] Cai Y T, Huang Y F, Zhang T P, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on the vertical distribution of soil nitrogen, carbon and microbial biomass in young *Schima superb* plantation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 ( 5 ): 755—760. [蔡玉婷, 黄永芳, 张太平, 等. 模拟氮沉降对木荷人工幼林地土壤氮素、碳素和微生物量垂直分布的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22 ( 5 ): 755—760.]
- [ 33 ] Belnap J. Factors influencing nitrogen fixation and nitrogen release in biological soil crusts//*Biological soil crusts: Structure, function, and management*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003: 241—261.
- [ 34 ] Yang Q Y, Zhao Y G, Bao T L, et al. Soil ecological stoichiometry characteristics under different types of biological soil crusts in the Hilly Loess Plateau region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 ( 8 ): 2699—2706. [杨巧云, 赵允格, 包天莉, 等. 黄土丘陵区不同类型生物结皮下的土壤生态化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 ( 8 ): 2699—2706.]
- [ 35 ] Wang Y, Zhao Y G, Yao C Z, et al. Surface roughness characteristics of biological soil crusts and its influencing factors in the hilly Loess Plateau region, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 25 ( 3 ): 647—656.
- [ 36 ] Yan D R, Zhang S N, Yan T. Variety characteristics of total soil minerals in mossy biological crusts[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33( 10 ): 145—149. [闫德仁, 张胜男, 闫婷. 苔藓结皮层土壤矿物质元素含量变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33 ( 10 ): 145—149.]

(责任编辑: 檀满枝)