

绿洲—荒漠过渡带植被群落分布与景观格局 对土壤养分空间分异的影响

董菲菲¹, 秦富仓^{1,2,3}, 董晓宇^{1,2}, 乌义汉¹, 赵龙飞¹, 马慧⁴

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018;

2. 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 呼和浩特 010018;

3. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010; 4. 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 探究绿洲—荒漠过渡带植被群落分布及其景观格局, 阐明其对土壤养分空间分异的影响, 进而为干旱的荒漠地区植被种植方式提供理论依据。[方法] 以腾格里沙漠南缘的绿洲—荒漠过渡带为研究区, 基于无人机影像提取景观格局指数, 采用描述性统计、地统计学分析土壤养分异质性特征, 并运用双变量空间自相关和 Pearson 相关性分析, 定量探讨了植被群落及其景观格局对土壤养分含量分异的影响。[结果] (1) 研究区土壤速效钾和全氮空间分异受结构性和随机因素共同影响, 但结构性因素的影响大于随机因素; 土壤有机质、速效磷的空间分异受随机因素影响较大。(2) 4种土壤养分的空间分布特征各不相同: 土壤速效钾、全氮和速效磷呈中部高四周低的分布格局, 有机质由西北向东南呈增加趋势, 土壤养分高值区的群落各不相同, 说明不同植被群落和土壤养分之间存在一定的关系。(3) 土壤养分对植被群落响应的内部差异较大, 其中白刺群落与土壤有机质、速效磷、速效钾均呈高一高集聚, 说明含白刺的群落会有利于当地沙地土壤恢复。(4) 对土壤养分含量影响最大的均为表征景观聚散性的指数, 表明植被群落较为连片会使土壤养分含量相对较高。[结论] 绿洲—荒漠过渡带植被群落分布及其景观格局对土壤养分空间分异的影响较大, 未来应合理种植荒漠地区植被, 使得土壤养分含量提高。

关键词: 植被群落; 景观格局; 土壤养分; 空间分异; 绿洲—荒漠过渡带

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0104-11

Influence of vegetation community distribution and landscape pattern in oasis-desert transition zone on spatial differentiation of soil nutrients

Dong Feifei¹, Qin Fucang^{1,2,3}, Dong Xiaoyu^{1,2}, Wu Yihan¹, Zhao Longfei¹, Ma Hui⁴

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot 010018, China; 2. State Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Desert

Ecosystem Protection and Restoration, Hohhot 010018, China; 3. Inner Mongolia Academy of Forestry

Sciences, Hohhot 010010, China; 4. Inner Mongolia Water Conservancy Research Institute, Hohhot 010020, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the distribution of vegetation communities and their landscape patterns in the oasis-desert transition zone, clarify their influence on the spatial differentiation of soil nutrients, and provide a theoretical basis for the vegetation planting methods in arid desert areas. [Methods] The oasis-desert transition zone at the southern edge of the Tengger Desert was taken as the study area, and the landscape pattern index was extracted based on unmanned aerial vehicle imagery. Descriptive statistics and geostatistics were used to analyze the characteristics of soil nutrient heterogeneity, and bivariate spatial autocorrelation and Pearson correlation analysis were also applied to quantitatively investigate the effects of vegetation communities and their

收稿日期: 2025-01-04

修回日期: 2025-06-26

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 2024年内蒙自治区科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目“腾格里沙漠锁边林分结构优化调控技术研究”(2024JBG0021-4-2)

第一作者: 董菲菲(2000—), 女, 青海西宁人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: dongff124@163.com

通信作者: 秦富仓(1966—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: qinfuc@126.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

landscape patterns on the spatial differentiation of soil nutrient content. [Results] (1) The spatial differentiation of soil available potassium and total nitrogen in the study area was influenced by both structural and random factors, but the influence of structural factors was greater than that of random factors; the spatial differentiation of soil organic matter and available phosphorus was mainly influenced by random factors. (2) The spatial distribution characteristics of the four soil nutrients were different: soil available potassium, total nitrogen and available phosphorus showed a distribution pattern of high in the middle and low in the surrounding area, organic matter showed an increasing trend from northwest to southeast, and the communities in the high-value areas of soil nutrients were different, which suggested that there was a certain relationship between different vegetation communities and soil nutrients. (3) The internal differences in the response of soil nutrient to vegetation communities were large, among which the white thorn community and soil organic matter, available phosphorus and available potassium were all in high-high clustering, indicating that the community containing white thorns would be favorable to the recovery of local sandy soils. (4) The indices characterizing landscape aggregation and dispersion had the greatest influence on soil nutrient content, indicating that more contiguous vegetation communities would result in relatively high soil nutrient content. [Conclusion] The distribution of vegetation communities and their landscape patterns in the oasis-desert transition zone have a significant impact on the spatial differentiation of soil nutrients. In the future, vegetation in desert areas should be rationally planted to improve the soil nutrient content.

Keywords: vegetation community; landscape pattern; soil nutrients; spatial differentiation; oasis-desert transition zone

土壤养分空间异质性是荒漠生态系统结构和功能的重要特征,深刻影响着植被格局与生态过程^[1]。土壤养分作为衡量土壤质量的重要指标^[2],其中的碳、氮、磷和钾等营养元素不仅反映了土壤肥力状况^[3],也是植物生长发育的必需元素。在沙地生态系统中,植物群落组成和演替受到土壤养分异质性的强烈影响^[4],基于此,明确不同植被群落及其景观格局对土壤养分的影响,可为当地植被的空间布局与土壤生产力的提高提供有效参考。

土壤养分的空间异质性是土壤养分在空间上的复杂性和变异性^[5]。大量研究表明,土壤养分的空间异质性受到植物群落、景观格局和人为干扰等因素的驱动^[4],在不同的区域,土壤养分的空间异质性存在较大差异。目前土壤养分空间异质性的研究主要集中在矿区^[6]、森林^[7]、农田^[8]和喀斯特地区等^[9]生态系统中,针对荒漠生态系统的研究却相对较少,其主要集中在土壤含水量与植被的耦合关系^[10]。土壤养分含量的研究方法主要采用描述统计分析等^[2],土壤养分的影响因素运用冗余分析(RDA)和地理探测器分析等^[6]方法探究,而采用反距离空间插值等定量分析的研究较少。对于土壤养分在景观格局层面的相关研究也较少,已有研究内容主要为景观格局与土壤养分研究^[11]。总的来看,将植被群落、景观格局和土壤养分关联起来的研究尚且不足,因此本研究分析绿洲—荒漠过渡带植被群落分布与景观格局对土

壤养分空间分异的影响。

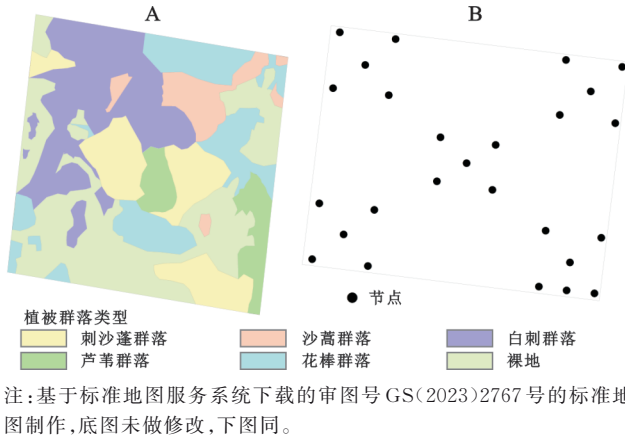
研究区地处腾格里沙漠的绿洲—荒漠过渡带,其是绿洲生态系统的重要组成部分,可表征绿洲生态系统的稳定性^[12]。同时,它也是绿洲和荒漠之间物质输送的缓冲带、绿洲的天然屏障,对地貌、土壤以及植被具有保护功能^[13]。研究区的生态保护修复和环境治理有利于加强腾格里沙漠生态保护、促进阿拉善左旗生态建设高质量发展。因此本研究以腾格里沙漠南缘的绿洲—荒漠过渡带的植被与土壤作为研究对象,采用景观格局指数、描述性统计和地统计学、空间自相关等方法分析研究区5种典型群落的土壤养分空间分布格局,探讨植被群落分布与景观格局对土壤养分空间分异的影响,以期干旱的荒漠地区植被种植方式提供理论依据,达到土壤养分含量提高的目的。

1 材料与方法

1.1 样地概况

本研究综合考虑了地形和海拔等因素,在腾格里沙漠南缘选取具有代表性的绿洲—荒漠过渡带为研究样地(103°42′36″—103°42′41″E, 28°17′43″—28°17′47″N),样地南北长约105m,东西长约105m,总面积约1.1025 hm²(图1)。研究区海拔为1411~1420m,年平均温度7.0~9.7℃,年降水量186mm,多集中于7—9月,属于典型的温带大陆性干旱气候。土壤主

要为风沙土,地势南高北低,坡度多在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。当地建群植物种为白刺(*Nitraria tangutorum*),样地中植物群落构成也明显不同,包括白刺、花棒(*Corethroedendron scoparium*)、芦苇(*Phragmites australis*)、刺沙蓬(*Salsola tragus*)和沙蒿(*Artemisia desertorum*)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2023)2767号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 样地概况与采样设计

Fig. 1 Overview of sample plot and sampling design

1.2 数据来源与处理

1.2.1 影像数据来源及获取方法 2024年8月植被

生长季期间,采用DJI Air 2S无人机(2 000万像素CMOS传感器)在样地进行数据采集。利用Litchi for DJ Drone软件将飞行高度设置20 m,相片重叠度设定为相邻航线重叠度80%,同航线重叠80%。为了易于后续无人机图像拼接,在样地的4个角及中心布设控制点,拍摄完成后用手持GPS对调查地点定位,确定坐标点的点位信息,将坐标点导入ArcGIS软件,创建点图层。根据航拍底图和样方点位GPS信息绘制植被群落矢量图(图1A)。

1.2.2 植被调查与土壤理化性质测定 植被调查:将样地划分为25个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的样方,将每个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的样方里植物的名称、种类进行统计。

土壤采样:按照“五点法”进行(图1B),在每个节点上按照对角线法取3份土,取样深度为0—15 cm,共计取土75份。土壤有机质:重铬酸钾氧化-外加热法;全氮:凯氏定氮仪;速效钾: NH_4OAc 浸提-火焰光度计法;速效磷: NaHCO_3 浸提-紫外分光光度计法。根据全国第二次土壤普查养分分级标准,将土壤养分含量分为6个等级(表1)。

表1 土壤养分含量分级标准

Table 1 Grading standards for soil nutrient content

等级	全氮/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	有机质/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	速效磷/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	速效钾/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	评价水平
一级	≥ 2	≥ 40	≥ 40	≥ 200	极丰富
二级	[1.50, 2)	[30, 40)	[20, 40)	[150, 200)	丰富
三级	[1, 1.50)	[20, 30)	[10, 20)	[100, 150)	中上
四级	[0.75, 1)	[10, 20)	[5, 10)	[50, 100)	中下
五级	[0.50, 0.75)	[6, 10)	[3, 5)	[30, 50)	缺乏
六级	< 0.50	< 6	< 3	< 30	极缺乏

1.2.3 景观格局指数选取 为全面反映研究区景观空间格局特征及避免景观格局信息冗余,参考前人相关成果^[14]。在研究区尺度上计算每个植被群落的景观百分比(PLAND)表征景观特征优势度,聚集度(AI)、连接度(COHESION)、散布与并列指数(IJI)表征景观特征聚散性,景观形状指数(LSI)表征景观形状,各指数的计算公式如下:

$$\text{PLAND} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100 \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为第*i*类景观类型中第*j*个斑块的面积(m^2);*A*为景观总面积(m^2);*n*为景观类型*i*的斑块总个数。

$$\text{AI} = \left[\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] \quad (2)$$

式中: g_{ii} 为相应景观类型的相似邻接斑块数量。

$$\text{COHESION} = \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^m p_{ij}}{\sum_{j=1}^m p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left(1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right)^{-1} \times 100 \quad (3)$$

式中: p_{ij} 为第*i*类景观中第*j*个斑块的周长(*m*);*m*为斑块类型总数; a_{ij} 为第*i*类景观类型中第*j*个斑块的面积(m^2);*A*为景观总面积(m^2)。

$$\text{IJI} = \frac{-\sum_{k=1}^m \left[\left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^m e_{ik}} \right) \ln \left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^m e_{ik}} \right) \right]}{\ln(m-1)} \quad (4)$$

式中: e_{ik} 为与某斑块类型*i*相邻的各斑块类型的邻接边长;*m*为斑块类型总数。

$$\text{LSI} = E/2\sqrt{\pi A} \quad (5)$$

式中: E 为景观中斑块边界的总长度; A 为景观总面积(m^2)。

1.2.4 土壤空间异质性分析 半方差函数是重要地统计工具,常用来分析土壤的空间变异性。计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (6)$$

式中: $\gamma(h)$ 为变量的半方差函数值; h 为样本间空间距离; $Z(x_i), Z(x_i + h)$ 为变量点在 x_i 和 $(x_i + h)$ 位置的观测值; $N(h)$ 为间距为 h 时的样本对数。

1.2.5 局部空间自相关 空间自相关分析能直观地表达某种空间现象的关联性与差异性。本研究基于50 m×50 m单元网格,将土壤养分分别与植被群落分布图进行叠加分析。局部莫兰指数(Moran's D)计算公式为:

表2 土壤养分的描述性统计及正态检验

Table 2 Descriptive statistics and normality test of soil nutrients

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	分布类型
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	12.427	106.165	53.648	28.988	0.540	-0.078	-1.216	正态分布
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	43.437	154.862	99.105	27.894	0.281	-0.178	-0.186	正态分布
有机质/(g·kg ⁻¹)	0.713	5.482	3.117	1.315	0.422	-0.188	-0.409	正态分布
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.007	0.353	0.171	0.11	0.643	0.143	-1.179	正态分布

2.1.2 土壤养分的空间异质性特征 本研究利用GS+ 9.0软件进行半方差函数模型拟合,分析土壤养分空间差异性。半方差函数模型参数中,块金系数 $[C_0/(C_0 + C)]$ 反映样本间的随机因素导致的空间变异占总体变异的比重,当块金系数大于0.75时,表明样本的空间异质性多由随机因素引起,系统空间相关性很弱;小于0.25时,表明样本的空间异质性主要受结构性因素的影响,系统具有强烈的空间相关性;介于0.25~0.75时,表明样本的空间异质性同时受到随机性因素和结构性因素的影响,系统具有中等的空间相关性。

对研究区土壤养分含量进行半方差函数模型拟合,根据决定系数选择最优拟合函数,获得半方差函数图(图2)。除速效磷外其余土壤养分的拟合函数决定系数均大于0.75,表明拟合结果较好(表3)。拟合结果显示,有机质块金值(0.067 8)明显高于其他指标,说明有机质采样尺度范围内变异较大。土壤有机质含量、土壤速效磷含量的块金系数分别为0.959,0.868,样点随机性较强,说明有机质和速效磷含量主要是因为随机因素而导致空间分异。土壤速效钾含量、土壤全氮含量的块金系数分别为0.602,0.524,表明其空间异质性受结构性因素和随机因素共同影响,且受结构性因素影响更大。土壤养分的变程在11.26~58.90 m,说明各土壤养分的空间自相

$$I = \frac{x_i - x_0}{s^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - x_1) \quad (7)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为空间单元 i 和 j 的值; S^2 为方差; n 为区域空间单元数量; w_{ij} 为基于空间邻接关系建立的权重矩阵; x_0, x_1 为 i 和 j 单元的平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤养分空间分异特征

2.1.1 土壤养分含量描述性统计分析 研究区土壤速效磷、速效钾、有机质、全氮平均值分别为53.648 mg/kg,99.105 mg/kg,3.117 g/kg和0.171 g/kg(表2),其变异程度由强到弱的顺序为全氮>速效磷>有机质>速效钾,速效钾为弱变异(0.281),变异性最小,速效磷和有机质为中等变异,全氮变异系数最大(0.643)。

关距离存在较大差异。

2.1.3 土壤养分的空间分布规律 各土壤养分空间分布存在差异,研究区土壤速效钾、有机质东南高,但中部和东部也存在低值区,速效磷和全氮呈中高四周低的分布格局(图3)。速效钾高值主要分布在白刺群落,低值分布在沙蒿群落。速效磷高值主要分布在芦苇群落,低值分布在白刺群落。有机质高值主要分布在刺沙蓬群落,低值分布在花棒群落。全氮高值主要分布在刺沙蓬群落和白刺群落,低值分布在沙蒿群落。

2.2 植被群落对土壤养分含量空间分布的影响

2.2.1 不同植被群落的土壤养分含量特征 不同植被群落的土壤养分含量的平均值存在较大的差异性(图4)。除速效磷含量(101.13 mg/kg)外,刺沙蓬群落的其余土壤养分含量均处于最高,但其全氮含量和有机质含量也明显处于极缺乏水平。速效磷含量(106.10 mg/kg)最高的花棒群落其速效钾(126.90 mg/kg)含量却最低。白刺群落的全氮平均值较高,但有机质和速效磷含量均低于其他群落。刺沙蓬群落速效钾含量的平均值(117.05 mg/kg)略高于芦苇群落(112.02 mg/kg)、白刺群落(103.30 mg/kg)、沙蒿群落(96.62 mg/kg)和花棒群落(93.55 mg/kg),但刺沙蓬和芦苇群落速效钾含量丰富的面积明显低于白刺群落。

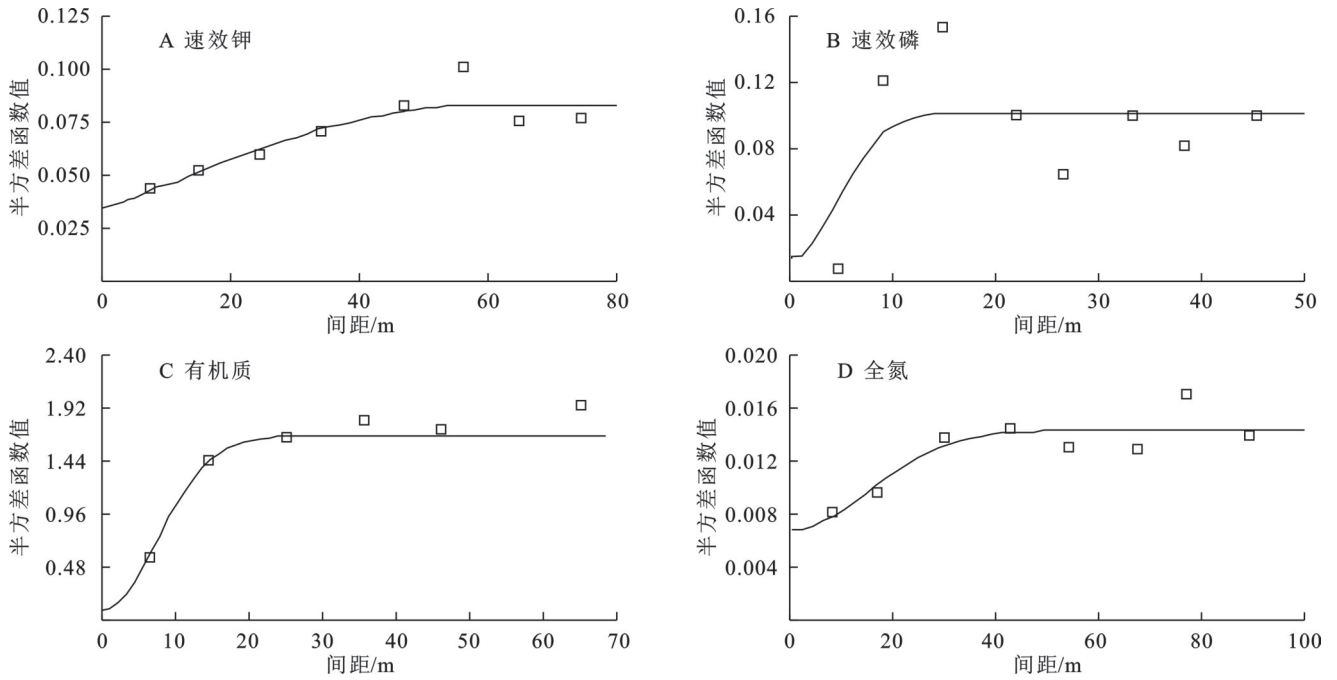


图 2 土壤各养分含量半方差函数

Fig. 2 Semi-variance function of soil nutrient content

表 3 土壤各养分含量半方差函数模型参数

Table 3 Model parameters of soil nutrient content semi-variance function

指标	变异函数模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程/m	块金系数(C_0/C_0+C)	决定系数
速效磷	高斯模型	0.0135	0.1022	11.26	0.868	0.513
速效钾	球状模型	0.0331	0.0832	58.90	0.602	0.790
有机质	高斯模型	0.0678	1.665	17.84	0.959	0.759
全氮	高斯模型	0.0068	0.0144	37.76	0.524	0.759

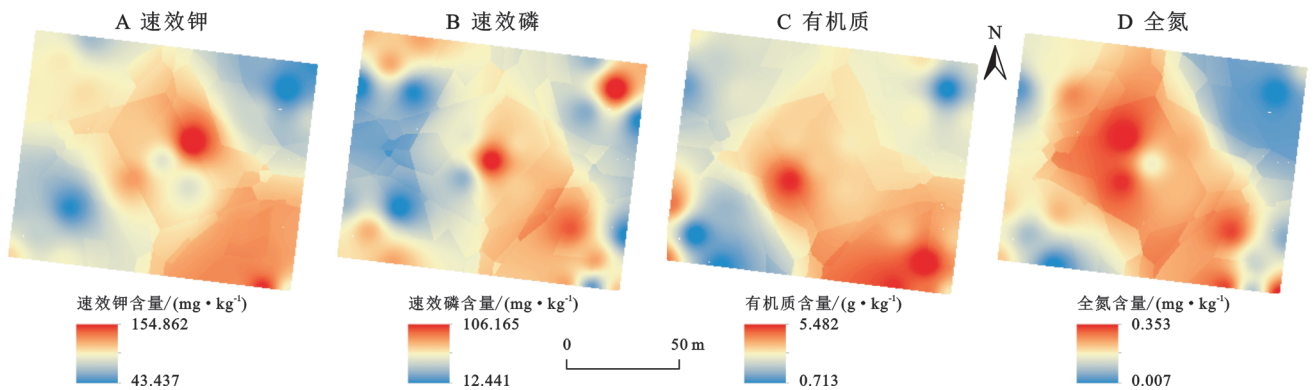


图 3 土壤各养分含量的反距离权重空间插值(IDW)

Fig. 3 Inverse distance weighting (IDW) spatial interpolation of each soil nutrient content

土壤速效磷含量等级以中下、丰富和极丰富为主,其中刺沙蓬群落的速效磷含量极丰富面积占比较大;速效钾含量等级以中下、中上和丰富为主,其中刺沙蓬群落的速效磷含量丰富面积占比最大。综上表明研究区的土壤有机质、全氮含量缺乏,速效钾含量适中,而速效磷含量充足。

2.2.2 植被群落与土壤养分含量空间集聚特征 植被群落面积与土壤养分含量存在明显的空间集聚特性(图 5)。白刺群落和芦苇群落与土壤全氮含量以

低—低集聚为主,主要分布在研究区中部和东南部,高一高集聚的主要植被群落为花棒群落、刺沙蓬群落。

白刺群落与土壤有机质含量以高一高集聚为主,主要分布在研究区的北部,还有零星分布的低—高集聚。刺沙蓬群落、沙蒿群落和芦苇群落与土壤有机质含量以低—低集聚为主,主要分布在研究区东部和中部,花棒群落与土壤有机质含量以高一低集聚为主,多为零星分布,主要镶嵌在低—低集聚之间。

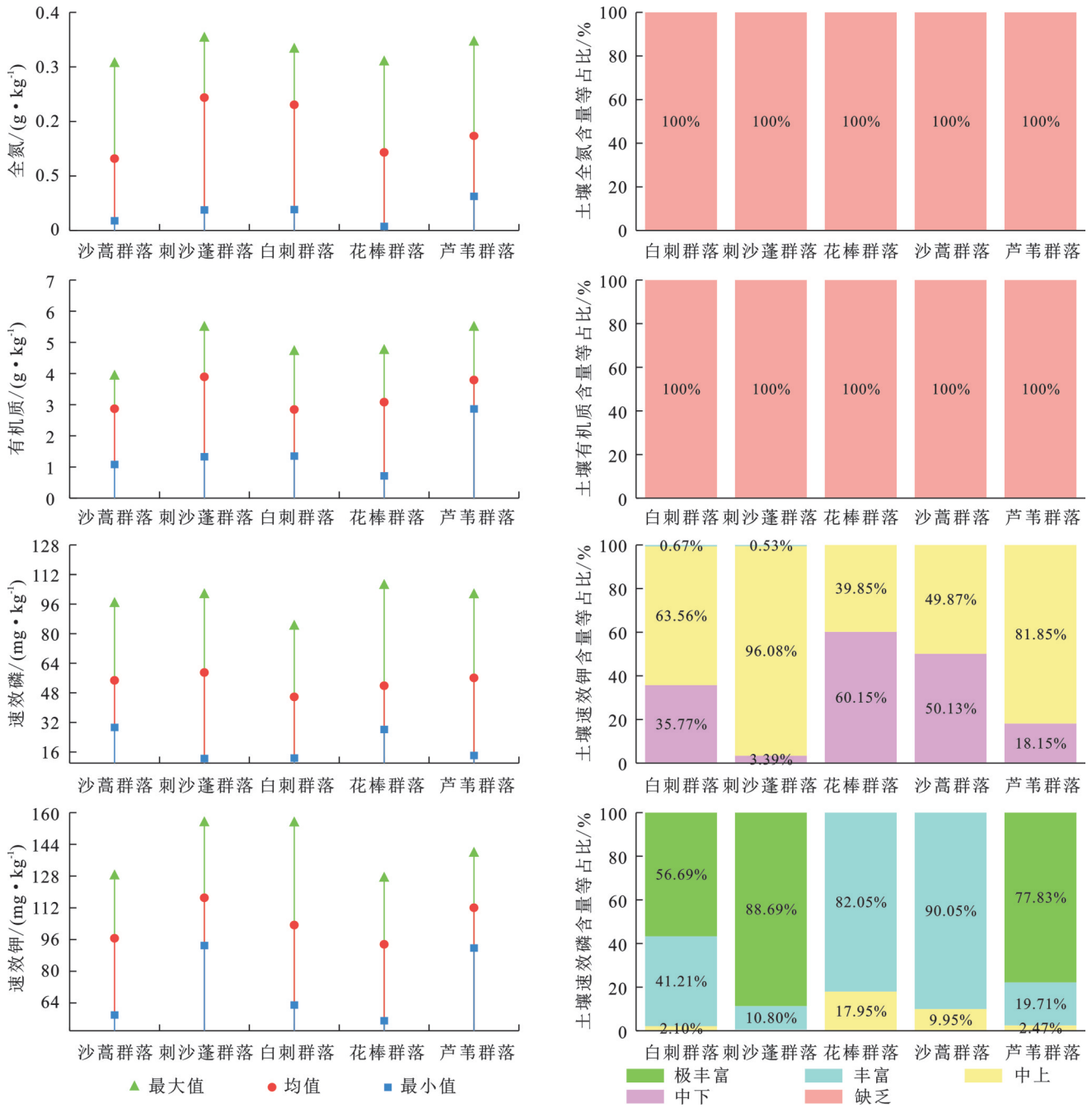


图 4 不同植被类型土壤养分含量特征

Fig. 4 Soil nutrient content characteristics of different vegetation types

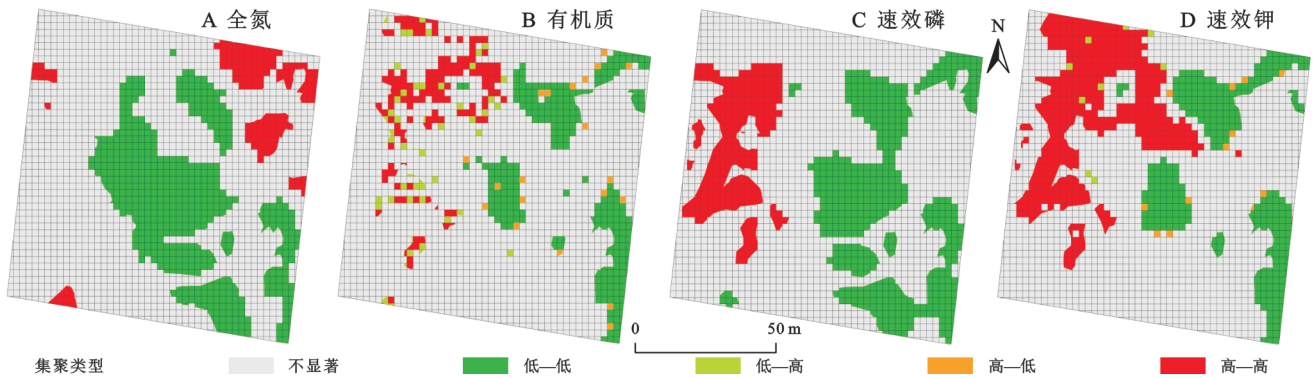


图 5 植被群落与土壤养分含量聚类分布

Fig. 5 Cluster distribution of vegetation communities and soil nutrient contents

植被群落面积与土壤速效磷含量的高—高集聚主要分布在研究区西部,其中刺沙蓬群落、沙蒿群落和芦苇与速效磷分布表现为空间负相关性,以低—低集聚为主;白刺群落、花棒群落、芦苇群落与速效磷含量以高—高集聚为主,说明它们呈极显著($p < 0.01$)的空间正相关性。

植被群落面积与土壤速效钾含量主要以西部的高—高集聚为主,有零星分布的低—高集聚和高—低集聚。白刺群落、芦苇群落与速效钾含量以高—高集聚为主,在西部呈集中分布。刺沙蓬群落与速

效钾分布以中部的低—低集聚为主,有零星分布的高—低集聚镶嵌其中。

图 6 反映了植被群落面积与土壤养分含量的相关性,植被群落面积与土壤速效磷含量的 Moran's I 值最高(0.936),表明其两者存在极显著($p < 0.01$)的空间自相关性。植被群落面积与土壤有机质含量的 Moran's I 值最低(0.290),表明两者的聚集程度低,空间随机性强。总的来说,这些结果表明植被群落面积与土壤速效磷的空间聚集最为明显,其次为土壤全氮含量和土壤速效钾含量,最后为土壤有机质含量。

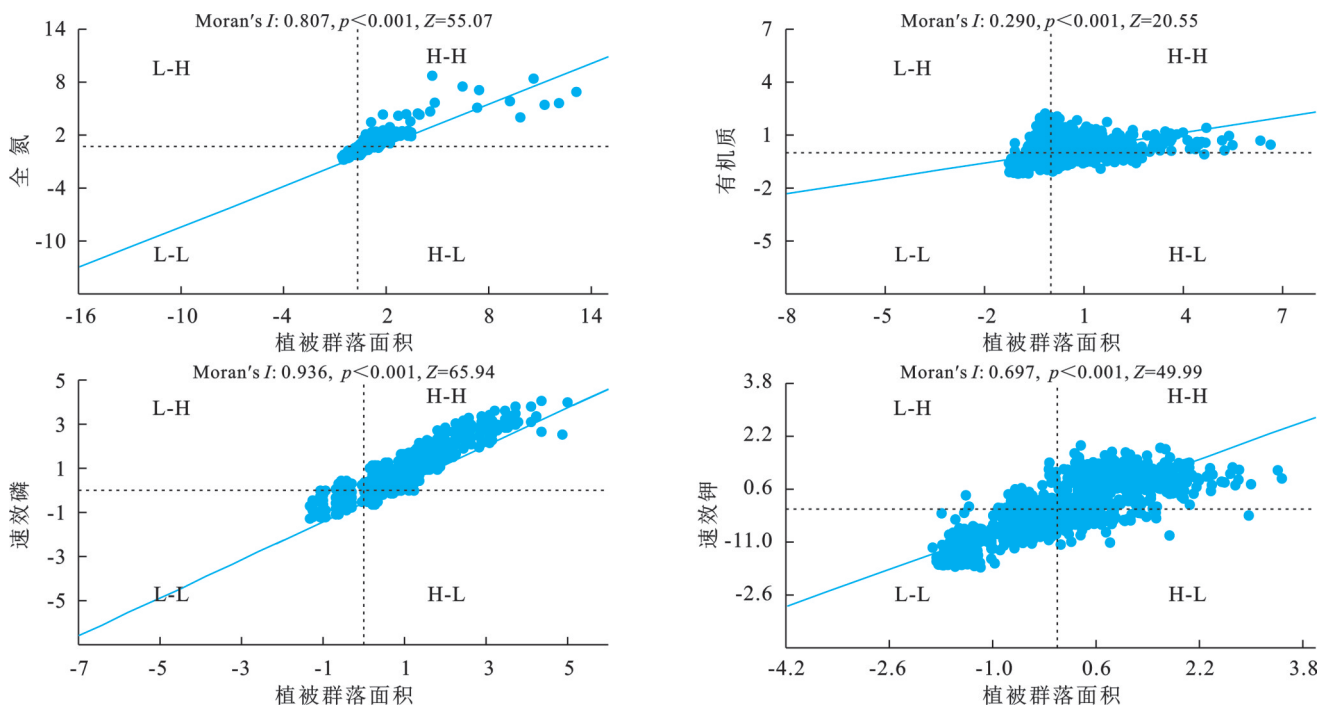


图 6 植被群落与土壤养分含量空间自相关散点图

Fig. 6 Scatterplot of spatial autocorrelation between vegetation communities and soil nutrient contents

2.3 景观格局对土壤养分含量空间分布的影响

2.3.1 不同植被群落下景观格局特征 由表 4 可知,不同植被类型的景观格局指数存在差异。白刺群落所占景观面积比例(PLAND)最大(29.063%),是研究区的基底斑块;沙蒿群落 PLAND 低于 10%。LSI 较高的群落类型为花棒群落和白刺群落,说明这两种群落形状较复杂,沙蒿群落的 LSI 较低,形状更为规则。从散布与并列指数(IJI)来看,花棒群落的分散程度高于其他群落,分散性较强。白刺群落的斑块结合度(COHESION)最大(99.205),说明群落结合度最好,邻接性强。聚合度(AI)差异较为明显,沙蒿群落聚集性最强,AI 值(84.008)高于其他群落。

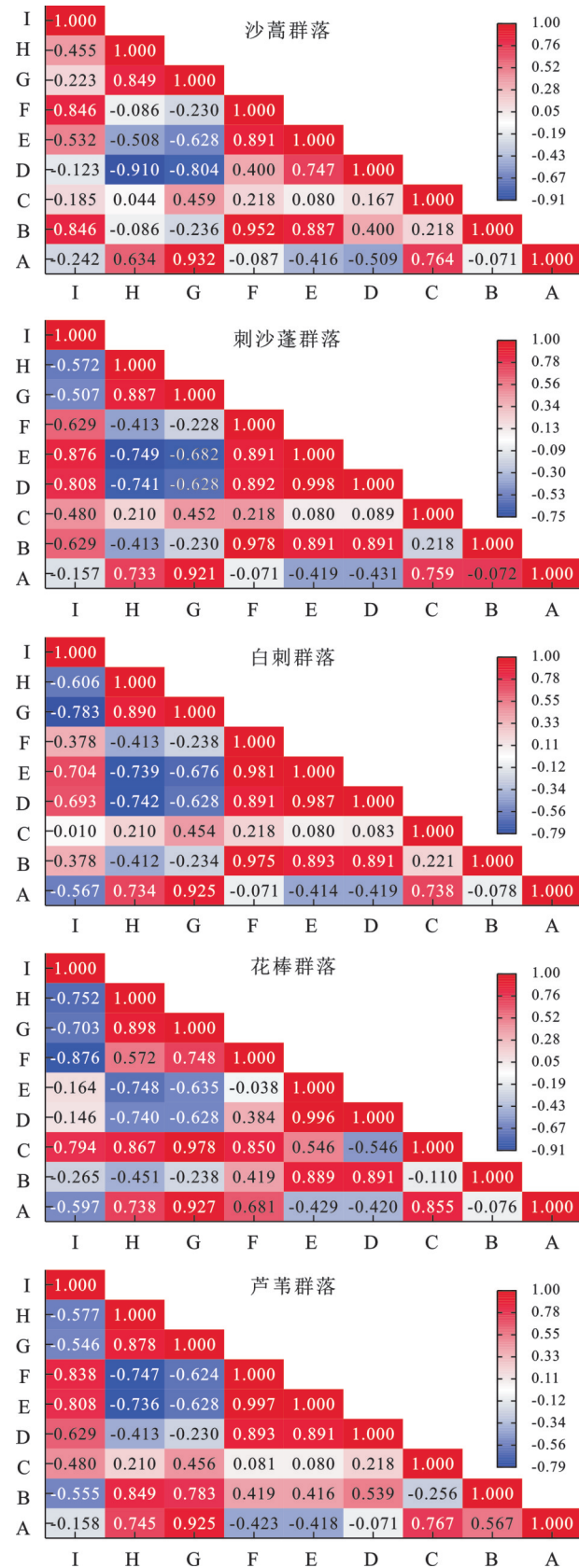
2.3.2 不同植被群落下景观格局指数与土壤养分的关系 每个群落的景观格局指数与土壤养分含量相关性分析结果显示(图 7)。所有群落的 LSI, IJI 与土壤的全氮含量呈负相关,与其相关性最大的是沙蒿群

落(-0.910, -0.804);所有群落的 COHESION, AI 与土壤的全氮含量呈正相关,其中刺沙蓬群落、花棒群落、白刺群落的 AI 与土壤的全氮含量呈极显著正相关($p < 0.001$);除沙蒿群落外,其他群落的 PLAND 与土壤的全氮含量均呈正相关。

表 4 各植被群落景观特征指数

Table 4 Landscape characteristic indices of each vegetation community

植被群落类型	PLAND	LSI	IJI	COHESION	AI
沙蒿群落	9.456	11.563	2.985	94.239	84.008
刺沙蓬群落	19.665	22.790	48.717	97.352	77.192
白刺群落	29.063	28.085	50.933	99.205	76.827
花棒群落	24.247	30.347	51.430	98.030	72.432
芦苇群落	17.569	16.196	2.703	94.713	83.191



注:A表示速效磷;B表示有机质;C表示速效钾;D表示全氮;E表示AI;F表示COHESION;G表示LJI;H表示LSI;I表示PLAND。

图 7 各植被群落景观格局指数与土壤养分含量的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between landscape pattern indices of vegetation communities and soil nutrient contents

各群落的景观格局指数与土壤的速效钾含量均呈正相关,其中花棒群落的 IJI 与土壤的速效钾含量相关性最大且呈极显著正相关 ($p < 0.001$)。各群落的 COHESION, AI 与土壤的有机质含量均呈正相关,与其相关性最大的是刺沙蓬群落的 COHESION (0.978);除花棒群落的 COHESION 与土壤的速效磷含量呈正相关 (0.681),其余群落的 COHESION 与土壤的速效磷含量均呈负相关;所有群落的 PLAND, AI 与土壤的速效磷含量呈负相关,其中花棒群落与它的相关性最大 (-0.597, -0.429);所有群落的 LSI, IJI 与土壤的速效磷含量呈正相关,其中相关性最大的为沙蒿群落的 IJI (0.932) 和芦苇群落的 LSI (0.745)。各群落的景观指数跟全氮的相关性最高,表明类型水平景观格局指数对土壤全氮含量的影响较大。

3 讨论

3.1 土壤空间异质性特征

土壤养分的空间异质性在区域尺度和中小尺度上都普遍存在^[15]。研究区内土壤速效磷、速效钾有机质和全氮均呈中等程度变异,说明土壤养分含量相对稳定^[16]。半方差拟合模型中除速效磷外其余土壤养分的模型拟合结果较好,说明土壤养分的分布具有一定依赖性^[17]。

随机因素和结构因素共同影响土壤性质的空间异质性,结构性因素会使土壤养分向异质性方向发展,而随机性因素会使其向均质化方向发展^[18]。研究区内土壤速效钾和全氮均呈现出中等的空间自相关特性,说明空间变异主要受结构性因素(母质、地形、气候)的影响。这可能是由于研究区早期放牧严重,植被稀疏,土壤养分循环能力下降,从而影响土壤养分空间变化。本研究结果显示速效磷为较弱程度空间自相关性,即母质、气候条件相对一致的情况下,空间分布主要受随机因素(取样设计、试验误差)的影响,这可能是由于土壤中磷的主要来源为岩石风化,磷积累缓慢使得分布相对均匀^[19]。研究区土壤养分存在不同程度的空间异质性与有效变程 (11.26~58.90 m),说明不同土壤养分自身形成的主导因素不同。

从空间上来看,土壤有机质、速效钾的空间分布格局相似性较高,说明二者形成的主导因素可能是一致的^[20]。全氮连续性较好;速效磷没有明显的规律,说明不同土壤养分的空间分布格局不同。从土壤养分含量等级来看,土壤有机质、全氮含量缺乏;速效钾含量适中;而速效磷含量充足,白刺群落作为基底斑块使速效磷、速效钾向冠幅下富集所导致的^[21]。

3.2 土壤养分含量对植被群落的响应

土壤养分含量的多少不仅影响植物个体的生长状况也影响整个群落的生产力^[22]。从空间尺度上来看不同的植被群落会对土壤养分的积累产生重要的影响,土壤养分的空间异质性对物种分布格局的维持至关重要^[23]。

土壤养分主要来自于土壤表层累积的枯落物,大量的枯落物有利于提高土壤养分含量^[24]。本研究发现,刺沙蓬群落的土壤养分含量均高于其他群落,这可能是由于刺沙蓬群落植被多样,沙蒿群落的植被和凋落物成分比较单一,冠幅空隙较大,不利于凋落物的积累和风沙的防固,导致其土壤养分不足。与土壤全氮含量呈高一高值主要分布的为刺沙蓬群落(图 5),表明刺沙蓬群落面积越大,土壤全氮含量越高,这可能是由于研究区内的刺沙蓬密度大,使得其地表枯落物增多,因此土壤养分含量相对较高。白刺群落与土壤有机质、速效磷和速效钾含量呈高一高值分布(图 5),这可能是由于白刺具有显著的“肥岛效应”使土壤养分在其周围聚集^[25],白刺群落枝叶可以拦截聚集沙物质,且在白刺灌丛周围不断堆积,增加灌丛土壤养分含量^[26]。

3.3 土壤养分含量对景观格局的响应

景观格局的变化与土壤养分含量有着密切关系^[27]。本研究中,除花棒群落外,其余群落的 PLAND, COHESION 与土壤速效磷含量呈负相关(图 7),表明群落越集中,则土壤速效磷含量越低^[9]。研究区所有群落的 LSI 与土壤养分含量呈正相关(图 7),可能是因为地貌特征差异所导致,研究区处于沙漠边缘的飞播林带,地形起伏大,白刺群落所占比重较大,易于土壤养分富集^[25]。所有群落的 PLAND 与土壤速效钾含量成正比,表明面积更大的群落会呈现出土壤速效钾含量增加的情况^[28]。

IJI 与土壤速效钾和速效磷含量呈显著正相关(图 7),表明随着景观多样性增加,各斑块之间边界的邻接概率提高,边缘效应的存在使得景观相邻周边物质能量的传递更为频繁。COHESION, AI 表征景观的聚散性,COHESION, AI 与土壤速效磷含量呈显著负相关(图 7),这是因为研究区为阿拉善左旗“飞播造林”工程重点区县,“飞播造林”工程易造成景观破碎化、聚集度降低^[29],张然等^[30]发现“飞播造林”工程能够促进土壤有机质积累。PLAND 一定程度上反映人类活动强度,但与各个群落的土壤养分含量关系不显著且正负相关均有,说明人类活动并非是影响土壤养分含量空间分布的主要因素。

4 结论

(1) 研究区土壤速效钾和全氮空间分异受结构性和随机因素共同影响,但结构性因素的影响大于随机因素,说明土壤养分含量受高程、地形起伏度、土壤类型等结构性因素较大;土壤有机质、速效磷的空间分异受随机因素影响较大。

(2) 4 种土壤养分的空间分布特征各不相同:土壤速效钾、全氮和速效磷呈中部高、四周低的分布格局,其高值区主要为白刺群落、刺沙蓬群落和芦苇群落,有机质东南略高,但中部和东部较低,其高值区主要为刺沙蓬群落。

(3) 土壤养分对植被群落响应的内部差异较大,其中白刺群落与土壤有机质、速效磷、速效钾均呈高一高集聚;花棒群落与土壤有机质呈高一低集聚;从整体上看,植被群落面积与土壤速效磷含量呈显著相关性,说明含白刺的群落会有利于当地沙地土壤恢复。

不同植被类型的景观格局指数存在差异,白刺群落为研究区的基地斑块,斑块结合度也最高;景观聚散性指数(特别是聚集度 AI)与土壤全氮含量呈现显著的正相关关系,表明在斑块类型水平上,刺沙蓬群落的空间聚集程度越高,其所在区域的土壤全氮平均含量也相对较高。

综上,本研究表明绿洲—荒漠过渡带土壤养分的空间分异受到植被群落类型本身(如刺沙蓬、白刺)及其空间配置格局(如聚集度)的共同影响,其中群落类型对养分空间格局的基础作用显著,而景观格局特征(聚散性)对特定养分(如全氮)的空间分布具有重要调控作用。

参考文献(References):

- [1] 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.
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.
- [2] 张凯,冯起,吕永清,等.民勤湖区表层土壤养分的空间异质性[J].干旱地区农业研究,2013,31(1):127-132.
Zhang K, Feng Q, Lü Y Q, et al. Spatial heterogeneity of surface soil nutrients in Minqin lake area [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013,31(1):127-132.
- [3] 毕银丽,胡晶晶,刘京.煤矿微生物复垦区灌木林下土壤养分的空间异质性[J].煤炭学报,2020,45(8):2908-2917.
Bi Y L, Hu J J, Liu J. Spatial heterogeneity of soil nutri-

- ents under shrubbery in micro-reclamation demonstration base in coal mine areas of China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8):2908-2917.
- [4] Zuo X A, Zhao H L, Zhao X Y, et al. Spatial pattern and heterogeneity of soil properties in sand dunes under grazing and restoration in Horqin Sandy Land, Northern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99(2): 202-212.
- [5] 岳天祥. 空间异质性定量研究方法[J]. *地球信息科学*, 1999, 1(2):75-79.
Yue T X. Quantitative research methods of spatial heterogeneity[J]. *Geo-information Science*, 1999, 1(2):75-79.
- [6] 夏春华, 方斌, 张志成, 等. 土壤养分空间分异对农地利用及其景观格局的响应: 以淮海经济区徐州市铜山区为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(19):8469-8487.
Xia C H, Fang B, Zhang Z C, et al. Response of soil nutrient spatial differentiation to agricultural land use and landscape pattern: taking Tongshan District, Xuzhou City, Huaihai Economic Zone as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19):8469-8487.
- [7] Qin Q Q, Wang H Y, Li X, et al. Spatial heterogeneity and affecting factors of litter organic carbon and total nitrogen over natural spruce-fir mixed forests in northeastern China [J]. *Catena*, 2019, 174:293-300.
- [8] Funes I, Savé R, Rovira P, et al. Agricultural soil organic carbon stocks in the north-eastern Iberian Peninsula: drivers and spatial variability [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 668:283-294.
- [9] Bai Y X, Zhou Y C. The main factors controlling spatial variability of soil organic carbon in a small karst watershed, Guizhou Province, China [J]. *Geoderma*, 2020, 357:113938.
- [10] 毛东雷. 策勒绿洲—沙漠过渡带植被与土壤水分空间异质性研究[J]. *现代农业科技*, 2011(13):252-255, 259.
Mao D L. Research on space heterogeneity of vegetation and soil moisture in oasis-desert ecotone in Cele County [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(13):252-255, 259.
- [11] Zhou Y, Taylor R J, Boutton T W. Divergent patterns and spatial heterogeneity of soil nutrients in a complex and dynamic savanna landscape [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(10): e2021JG006575.
- [12] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算[J]. *生态学报*, 2000, 20(2):243-250.
Jia B Q, Ci L J. The primary estimation of water demand by the eco-environment in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2):243-250.
- [13] 穆桂金, 贺俊霞, 雷加强, 等. 再议绿洲—沙漠过渡带: 以策勒绿洲—沙漠过渡带为例[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2):195-202.
Mu G J, He J X, Lei J Q, et al. A Discussion on the transitional zone from oasis to sandy desert: a case study at Cele Oasis [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 195-202.
- [14] Huang S, Xiao L S, Zhang Y C, et al. Interactive effects of natural and anthropogenic factors on heterogeneous accumulations of heavy metals in surface soils through geodetector analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789:147937.
- [15] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 等. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(10):1038-1049.
Zhang Z H, Hu G, Zhu J D, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and its impact on tree species distribution in a karst forest of Southwest China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10):1038-1049.
- [16] 韩彦隆, 魏亚娟, 左小锋, 等. 吉兰泰荒漠绿洲过渡带土壤生态化学计量特征及养分恢复状况研究[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2):207-214, 223.
Han Y L, Wei Y J, Zuo X F, et al. Study on soil stoichiometry characteristics and nutrient restoration status in the Jilantai desert-oasis ecotone [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2):207-214, 223.
- [17] 熊凯, 赵玉娟, 陈健, 等. 川西米亚罗亚高山暗针叶林土壤pH和养分空间异质性分析[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(2):55-64.
Xiong K, Zhao Y J, Chen J, et al. Spatial heterogeneity of soil pH and nutrients in Miyaluo Subalpine dark coniferous forest of western Sichuan, southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(2):55-64.
- [18] 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 等. 基于GIS和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异: 以周口为例[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4):1211-1220.
Jia Z Y, Zhang J H, Ding S Y, et al. Spatial variation of soil phosphorus in flooded area of the Yellow River based on GIS and geo-statistical methods: a case study in Zhoukou City, Henan, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4):1211-1220.
- [19] 牟晨, 王海燕, 崔雪, 等. 长白山天然针阔混交林土壤养分空间异质性及影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2024, 30(5):894-903.
Mu C, Wang H Y, Cui X, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and its influencing factors in natural coniferous and broad-leaved mixed forest in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2024, 30(5):894-903.
- [20] 席丽, 李思瑶, 夏晓莹, 等. 天山云杉林土壤养分空间异质性及环境解释[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42

- (10):93-101,167.
- Xi L, Li S Y, Xia X Y, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and environmental interpretation in *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(10):93-101,167.
- [21] 任雪. 北疆绿洲—荒漠过渡带灌木“肥岛”效应特征及其环境学意义研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2008.
- Ren X. The characteristics of “fertile island” on shrubs at an oasis-desert ecotone and its significant on arid region in the north of Xinjiang[D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2008.
- [22] 褚清河, 潘根兴, 李典有, 等. 氮磷等比与以磷定氮条件下玉米的最大施肥量研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1083-1089.
- Chu Q H, Pan G X, Li D Y, et al. Maximum fertilization rates for corn with fixed N/P ratio or with N rate varying with P rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6):1083-1089.
- [23] 张凤杰, 乌云娜, 杨宝灵, 等. 呼伦贝尔草原土壤养分与植物群落数量特征的空间异质性[J]. 西北农业学报, 2009, 18(2):173-177, 183.
- Zhang F J, Wu Y N, Yang B L, et al. The research on the spatial heterogeneity of the soil nutrient and the quantitative properties of plant communities in Hulunbeier Steppe[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(2):173-177, 183.
- [24] Kurmangozhinov A, Xue W, Li X Y, et al. High biomass production with abundant leaf litterfall is critical to ameliorating soil quality and productivity in reclaimed sandy desertification land[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263:110373.
- [25] 王湘, 焦菊英, 曹雪, 等. 柴达木盆地尕斯库勒湖白刺灌丛沙堆剖面土壤养分的分布和富集特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3):765-774.
- Wang X, Jiao J Y, Cao X, et al. Distribution and enrichment characteristics of soil nutrients in the nekhas profile of *Nitraria tangutorum* in Gahai Lake Area, Qaidam Basin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3):765-774.
- [26] 赵灵. 中国沙棘对青藏高原高寒草甸土壤性质的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- Zhao L. Influence of *Hippophae rhamnoides* on soil properties in alpine meadow ecosystems of Qinghai-Tibet Plateau, China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [27] 高艳霞, 徐东瑞. 石家庄市边缘带土壤养分空间分布特征研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5):1063-1068.
- Gao Y X, Xu D R. The spatial distribution of soil nutrients in Shijiazhuang peri-urban zone[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(5):1063-1068.
- [28] 黄仕辉. 土壤重金属分布对土地利用景观格局的响应研究: 以扬中市为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- Huang S H. Research on the response of heavy metal distribution in soil to land use landscape pattern: a case study of Yangzhong City[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.
- [29] 张靖. 1977—2012年乌审旗沙漠化演变景观格局分析[J]. 大连民族学院学报, 2014, 16(3):253-257.
- Zhang J. Landscape pattern analysis on changes of desertification of Uxin from 1977 to 2012[J]. Journal of Dalian Minzu University, 2014, 16(3):253-257.
- [30] 张然, 高永, 梁钰镁, 等. 两种飞播植物对结皮土壤颗粒组成和有机质的影响[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(7):172-181.
- Zhang R, Gao Y, Liang Y M, et al. Effects of two aerial plants on soil particle composition and organic matter in crust soil[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025, 27(7):172-181.