

DOI:10.11686/cyxb2024175

http://cyxb.magtech.com.cn

李家新, 景亚泓, 张俊, 等. 基于GIS技术和聚类分析的汾河上游草地土壤养分空间特征分析. 草业学报, 2025, 34(3): 17-28.

LI Jia-xin, JING Ya-hong, ZHANG Jun, *et al.* Analysis of spatial characteristics of soil nutrients in grasslands in the Fenhe River upper reaches using GIS technology and cluster analysis. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 17-28.

基于GIS技术和聚类分析的汾河上游草地土壤养分空间特征分析

李家新^{1,2,3}, 景亚泓^{1,2,3}, 张俊^{1,2,3}, 净思璞^{1,2,3}, 杨宇星^{1,2,3}, 范博阳^{1,2,3}, 路文杰^{1,2,3*}

(1. 山西农业大学草业学院, 山西 太谷 030801; 2. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 山西 太谷 030801; 3. 草地生态保护与乡土草种质资源创新山西省重点实验室, 山西 太谷 030801)

摘要: 土壤环境的保护和治理在促进草地健康可持续发展中发挥着关键作用。本研究利用地理信息系统技术, 对汾河上游81个草原点的土壤养分状况进行了调查。以土壤化学性质为主要标准的聚类分析将81个地点的表层土壤分为3类。本研究评估了0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm这3个深度的土壤养分空间特征。研究发现, 研究区草地土壤健康水平较差, 自然含水率较低, 全磷及碱解氮含量相对匮乏, 土壤pH属弱碱性。各类养分相关指标的空间分布特征存在显著差异。不同指标在不同土层中的最佳拟合模型不同, 多数指标的空间自相关性较弱, 土壤养分空间变异主要受结构因素和随机因素共同影响; 各指标在水平方向上存在明显的空间变异规律。土壤养分浓度高的地点周围也有土壤养分含量高的地点, 即高一高集聚区, 主要分布在汾河源头地区。土壤养分浓度低的地点也被土壤养分低的地点包围, 即低一低集聚区, 主要分布在汾河流域东部。低一高集聚区域较为分散, 高一低集聚区较少, 主要分布在汾河上游南部; 在垂直方向上, 土壤养分含量具有随着土层的加深而逐渐减少的趋势。各指标的集聚特征无明显的变化规律。研究结果可为退化草地修复提供科学合理的指导意见。

关键词: 汾河上游; 土壤健康; 聚类分析; 地统计学; 空间自相关

Analysis of spatial characteristics of soil nutrients in grasslands in the Fenhe River upper reaches using GIS technology and cluster analysis

LI Jia-xin^{1,2,3}, JING Ya-hong^{1,2,3}, ZHANG Jun^{1,2,3}, JING Si-pu^{1,2,3}, YANG Yu-xing^{1,2,3}, FAN Bo-yang^{1,2,3}, LU Wen-jie^{1,2,3*}

1. College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. Key Laboratory of Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Taigu 030801, China; 3. Shanxi Key Laboratory of Grassland Ecological Protection and Native Grass Germplasm Innovation, Taigu 030801, China

Abstract: Protecting and managing the soil environment plays a key role in ensuring the sustainable development of grasslands. This study employed geographic information system technology to investigate the soil nutrient status at 81 sites in grasslands in the upper reaches of Fenhe River. Cluster analysis with soil chemical properties as the primary criteria was used to group the surface soil of the 81 sites into three categories. The study evaluated spatial characteristics of soil nutrients for three soil horizons: 0–10 cm, 10–20 cm, and 20–30 cm. It was found that the

收稿日期: 2024-05-14; 改回日期: 2024-07-15

基金项目: 山西农业大学科技创新基金(2018YJ38), 山西省应用基础研究计划(202203021221166)和山西省高等学校大学生创新创业训练计划项目(20240237)资助。

作者简介: 李家新(1998—), 男, 河北唐山人, 在读硕士。E-mail: lijiaxin299@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: luwenjie1231104@126.com

overall level of grassland soil health in the study area was suboptimal, with low natural moisture content, relatively scarce total phosphorus and alkaline nitrogen content, and a weakly alkaline soil pH. There are significant differences in the spatial distribution characteristics of various nutrient related indicators. The best fitting models of these different indicators varied between soil horizons, and the spatial autocorrelation of most indicators was weak, which indicates that the spatial variation of soil nutrients is primarily impacted by both structural and random factors. In the horizontal direction, a distinct spatial pattern was observed for each indicator. Sites with high soil nutrient concentrations surrounded by sites also with high soil nutrients, known as high-high concentration aggregation zones, were predominantly found in the headwaters of the Fenhe River, while sites with low soil nutrient concentrations also surrounded by sites with low soil nutrients, known as low-low concentration aggregation zones, occurred mainly in the eastern part of the Fenhe River basin. Low-high clustering areas were scattered, and high-low clustering areas were less frequent and mostly located in the southern part of the upper reaches. Vertically, across the three soil horizons at sampling sites, no significant spatial variation was observed for total potassium and the content of other related soil chemical properties decreased with soil depth. The clustering characteristics of each soil property did not show a clear change with depth. The results provide scientific and reasonable guidance for the restoration of degraded grasslands.

Key words: the upper reaches of Fenhe River; soil health; cluster analysis; geostatistics; spatial autocorrelation

草地资源是重要的自然资源,健康的土壤是维持草地植物、动物和人类生活生态系统可持续的基础^[1-2]。土壤养分空间分布特征分析能够为生态环境保护和退化草地修复提供重要依据。地统计学中的技术方法已被广泛地应用于土壤养分的研究^[3-4]。王学寅等^[5]综合采用地统计学、GIS和传统统计分析方法,研究了瑞安市耕作层土壤9种养分元素有效态含量空间变异特征及其影响因素。陈清霞等^[6]将地统计分析方法与莫兰指数法结合,分析得出土壤pH呈斑块状镶嵌分布,且具有小范围、中等程度的空间相关性。大多数针对草地土壤指标空间特征的研究是在单一指标的数据前提下,缺少多种指标之间全面的对比研究,其研究结果的精度受限。

聚类分析属于无监督机器学习方法,其目的是将样本划分为若干个不同群组,通过聚类得到的草地土壤退化评价指标区域分布特征,能够对土壤空间变异特征的相关研究结果起到补充说明的作用,在草地土壤退化评价中运用较多^[7]。近年来,因其可以最大限度地减少人为主观因素的影响,聚类分析法已成为土壤健康研究中应用最为广泛的数理统计方法^[8-9]。江晓龙^[10]选取了8个指标,采用主成分分析法和聚类分析法对永泰县土壤养分相关指标进行综合评价,最大限度地减少人为主观因素的影响。靳志丽等^[11]通过对永州市79个乡镇的689个植烟土壤样品进行统计分析,从而掌握烟草种植区土壤化学性状指标变化特征;谭国娟等^[12]将变异性分析与聚类分析结合,研究了榆树(*Ulmus pumila*)疏林草原植被群落的生境分异特征,结果表明,科尔沁榆树疏林草原可以划分为2类,分别对应平原生境和典型沙地生境。

汾河作为山西省的“母亲河”,其上游地区是山西省乃至中国华北地区的重要水源涵养地,保护该地区的生态环境对于维护整个流域的生态平衡、水资源供应具有重要意义^[13]。近年来,在各种不利因素的共同影响下,汾河流域上游地区草地土壤健康状况受到威胁。鉴于此,本研究运用GIS技术中的地统计方法、莫兰指数法并结合聚类分析,探究汾河上游地区土壤养分相关指标的变异特征、集聚特征及其空间自相关程度,以期对汾河上游地区土壤养分空间特征进行科学评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汾河发源于山西省宁武县管涔山,干流全长716 km,流域总面积为38728 km²。上游地区位于山西省西北部(38°7'—39°8' N, 111°22'—112°39' E),地形以山地和丘陵为主,上游总长约160 km,属温带大陆性季风气候,季

节分明,多年平均降水量为437.6 mm,主要集中在6—9月且多暴雨,占全年降水量的75.29%;植被以森林草原和山间草地为主;土壤类型以褐土和淋溶性褐土为主,并含有少量草甸土、棕壤。

1.2 研究方法

2021年8—10月,根据汾河上游地区的地形地貌特征选取81处草地(图1),每个样地设置3~8处采样点。取样时尽可能使采样点均匀分布,每个采样点采集0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 3个土层土壤样品,在除去植物根茎、石块等杂物后将每个样地相同土层的样品混合作为最终样品,将样品装入袋中并且做好标记,总计得到243个样品。除一部分土样放入铝盒烘干测量自然含水率(natural moisture content, NMC)外,其余样品带回实验室进行风干、过2 mm筛、研磨。

采用pH计(HZP-T503型,福建)测定土壤pH(水土比为5:1);土样处理方法以及除速效磷和速效钾外的相关指标测定方法参考《土壤农化分析》^[14]。具体如下:土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量采用重铬酸钾容量法—硫酸外加热法测定;全氮(total nitrogen, TN)含量采用凯氏定氮法测定;全磷(total phosphorus, TP)含量采用氢氧化钠熔融法测定;全钾(total potassium, TK)含量采用氢氧化钠熔融法测定;碱解氮(available nitrogen, AN)含量采用碱解蒸馏法测定;速效磷(available phosphorus, AP)含量采用0.5 mol·L⁻¹碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法^[15]测定;速效钾(available potassium, AK)含量采用乙酸铵提取—火焰光度法^[16]测定。

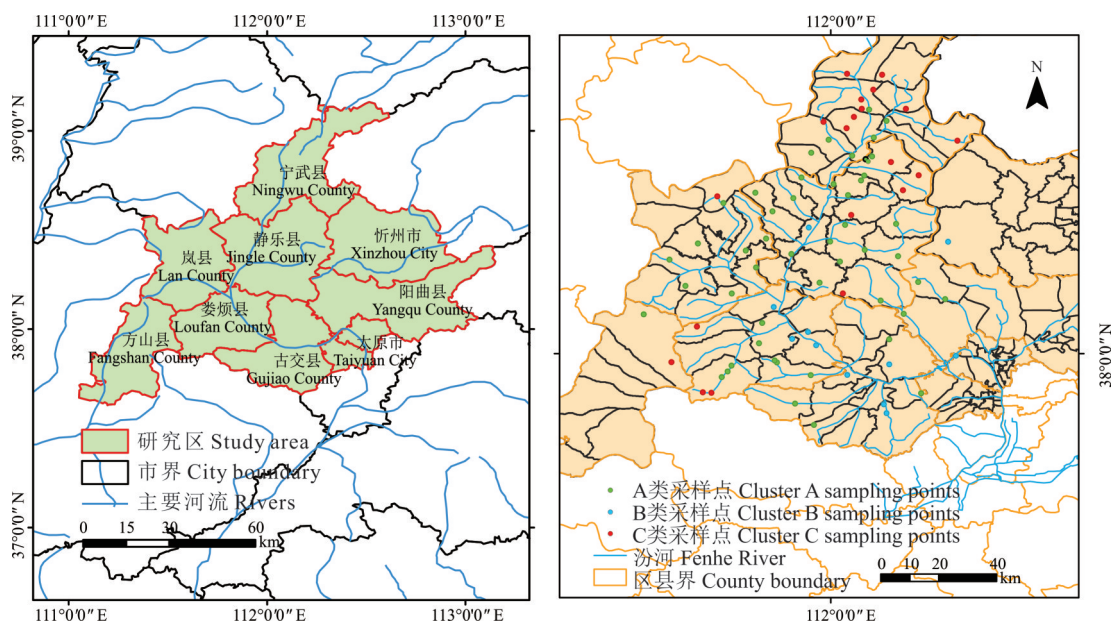


图1 研究区地理位置及采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and the distribution of sampling sites

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2020)4619 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

1.3 统计分析

1.3.1 研究区采样点聚类分析 本研究选取有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷以及速效钾含量为变量,结合pH和自然含水率对81个样地表层(0~10 cm)土壤样品进行系统聚类,采用欧氏距离最短法^[12]对研究结果进行评价,在相应聚合水平之间,将样地土壤划分为具有不同方面特征的若干组。

1.3.2 地统计分析 地统计方法是通过半变异函数来研究区域特征的常用方法,能够揭示随机因素和自然因素对研究对象的影响程度^[17]。其中,块金值(C_0)代表人类活动等随机因素引起的随机变异,基台值(C_0+C)为空间总变异程度,块金值(C_0)与基台值(C_0+C)的比是评价空间变异程度的重要参数^[18]。在统计分析时,使用

GS+9.0软件进行半变异函数模型筛选,以此来确定最优拟合模型;运用 ArcGIS 10.8软件中的克里金插值模块进行插值,得到空间分布规律图。

1.3.3 全局空间自相关 全局空间自相关能反映相邻区域指标间的相互依赖性^[19],并通过计算 Moran's *I*指数来揭示汾河上游地区相关评价指标空间自相关性的整体趋势,其计算公式如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: n 为样品数; x_i 和 x_j 代表空间上在 i 和 j 处的实测值; W_{ij} 代表空间权重矩阵; \bar{x} 为样本数据平均值。Moran's *I*指数为 $-1 \sim 1$ ^[20],小于0表示负相关,大于0表示正相关,其绝对值越大,空间自相关性越明显。通过 Z 得分可以检验结果显著性,且仅在 $P < 0.05$ 时具有意义,若 $P \geq 0.05$,则无意义,无法判断是否存在空间相关性,当 $|Z| \geq 2.58$ 时为极显著空间自相关。

1.3.4 空间聚类分析 空间聚类分析通过局部自相关反映相关指标空间相关性的特征,计算公式如下:

$$\text{Moran's } I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

局部自相关最终将空间集聚特征划分为4种类型,分别为高一高集聚、高一低集聚、低一高集聚以及低一低集聚。通过空间集聚特征图能够呈现出局部地区土壤相关指标的关联性^[21]。

1.4 数据处理

本研究利用 SPSS 27.0对聚类分析过程中的研究区表层(0~10 cm)土壤样品相关指标进行数据标准化处理,类间距离选取组间联接法。利用 GS+9.0软件进行半变异函数的参数计算及拟合模型筛选。利用 ArcGIS 10.8软件进行数据分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 研究区采样点聚类分析

根据不同样地土壤养分特征之间的相似性,欧氏距离为 15 ^[22]并且聚类为3类时,聚类效果较好。系统聚类结果表明,A类采样点在汾河上游各地段均有分布,B类采样点主要分布在汾河上游尾端干流附近,C类采样点集中分布在汾河发源地宁武县及其附近区域(图1)。

就采样点分布范围而言(图1),A类采样点覆盖范围较广;B和C类采样点覆盖范围较小。就采样点相关指标含量状况而言,其土壤养分特性具有明显差异(表1):A类区域样品,有机质以及全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量最低;B类区域样品,有机质、全磷、自然含水率、速效钾含量最高;C类区域样品,全氮以及全钾、碱解氮和速效磷含量最高。综上所述,最终将研究区采样点聚为3类,记为A、B、C。聚类的结果表明,研究区内土壤异质性分布规律比较明显,B和C类采样点涉及区域土壤养分状况相对较好,参考全国第二次土壤普查土壤养分分级标准^[23],研究区内土壤呈现弱碱性,自然含水率较低,全磷及碱解氮含量匮乏,区域内的土壤健康水平较差。

表1 各聚类类别相关指标平均含量统计

Table 1 Statistics of average content of relevant indicators for each cluster category

类别 Type	pH	有机质 Organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 Total phosphorus ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾 Total potassium ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Available nitrogen ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available phosphorus ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	自然含水率 Soil water content (%)
A	8.39	16.9	0.89	0.37	13.25	45.44	11.40	179.95	12.5
B	8.38	23.7	0.80	0.40	13.32	52.88	15.31	250.40	13.3
C	7.90	23.4	1.19	0.35	14.68	66.71	16.17	202.59	12.1

2.2 化学性状指标半变异模型函数筛选

在 0~10 cm 土层中, AN 的块基比 < 0.25 , 空间自相关程度较强, 表明该指标的变异特征主要受自然因素影响; SOM、TN、TP、TK 的块基比为 $0.25 \sim 0.75$, 表明上述指标具有中等程度空间自相关性, 其变异特征受自然因素和随机因素共同影响; AP、AK 的块基比均 > 0.75 , 具有较弱的空间自相关性, 其变异特征受随机因素影响较大。其中, SOM、TN、TP 最优拟合模型为指数模型, 其余指标为高斯模型(表 2)。

在 10~20 cm 土层中, TK 的块基比 < 0.25 , 表明该指标的空间自相关程度较强, 其变异特征主要受自然因素影响; SOM、TN、TP、AP、AK、AN 的块基比均 > 0.75 , 具有较弱的空间自相关性, 其变异特征受随机因素影响较大。TK 的最优拟合模型为线性模型, TN 为球面模型, 其余指标为高斯模型(表 3)。

表 2 0~10 cm 土层相关指标半变异函数参数

Table 2 Semivariogram parameters of relevant indicators in 0–10 cm soil layer

指标 Index	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range (km)	决定系数 Coefficient of determination	块基比 Nugget/sill
有机质 Organic matter	指数 Exponential	3522.000	4982.000	0.9660	0.827	0.707
全氮 Total nitrogen	指数 Exponential	0.195	0.301	0.1170	0.159	0.648
全磷 Total phosphorus	指数 Exponential	0.014	0.027	0.3960	0.396	0.519
全钾 Total potassium	高斯 Gaussian	6.710	9.130	0.0282	0.842	0.735
速效磷 Available phosphorus	高斯 Gaussian	109.800	109.900	0.1143	0.521	0.999
速效钾 Available potassium	高斯 Gaussian	11418.000	11430.000	0.0918	0.681	0.999
碱解氮 Available nitrogen	高斯 Gaussian	127.089	819.194	0.4983	0.344	0.155

表 3 10~20 cm 土层相关指标半变异函数参数

Table 3 Semivariogram parameters of relevant indicators in 10–20 cm soil layer

指标 Index	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range (km)	决定系数 Coefficient of determination	块基比 Nugget/sill
有机质 Organic matter	高斯 Gaussian	95.500	100.100	0.1160	0.720	0.954
全氮 Total nitrogen	球面 Spherical	0.137	0.176	0.1220	0.301	0.778
全磷 Total phosphorus	高斯 Gaussian	0.018	0.021	0.0237	0.168	0.857
全钾 Total potassium	线性 Linear	0.114	8.266	0.5211	0.216	0.014
速效磷 Available phosphorus	高斯 Gaussian	92.800	92.900	0.1160	0.539	0.999
速效钾 Available potassium	高斯 Gaussian	3753.000	3843.000	0.1126	0.669	0.977
碱解氮 Available nitrogen	高斯 Gaussian	324.812	405.809	0.0109	0.199	0.800

在 20~30 cm 土层中, TP、AN 的块基比 < 0.25 , 表明上述指标空间自相关程度较强, 其变异特征主要受自然因素影响, TK 的块基比为 $0.25 \sim 0.75$, 具有中等程度的空间自相关性, 其变异特征受自然因素和随机因素共同影响; SOM、TN、AP、AK 的块基比均 > 0.75 , 具有较弱的空间自相关性, 其变异特征受随机因素影响较大。TN、TK、AP 的最优拟合模型为球面模型, SOM、TP、AK 为高斯模型, AN 则为线性模型(表 4)。

2.3 化学性状指标的空间变异特征分析

根据半变异函数的最优拟合模型, 通过 ArcMap 10.8 软件使用普通克里金插值法制作汾河上游地区土壤养分相关化学性状指标空间分布规律图(图 2~4)。综合研究结果来看, 汾河上游地区草地土壤化学性状指标在水平方向和垂直方向上都存在明显的变化规律, 空间变异特征明显。

在 0~10 cm 土层中, 全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾含量变化趋势呈团块状镶嵌分布。从方向性上看, 有机质和碱解氮含量变化趋势大致呈东高西低的趋势。其中, 有机质含量变化有极性分布趋势, 汾河上游区域西北部整体含量较其他地区低。

表 4 20–30 cm 土层相关指标半变异函数参数

Table 4 Semivariogram parameters of relevant indicators in 20–30 cm soil layer

指标 Index	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range (km)	决定系数 Coefficient of determination	块基比 Nugget/sill
有机质 Organic matter	高斯 Gaussian	72.000	78.100	0.1386	0.877	0.922
全氮 Total nitrogen	球面 Spherical	0.076	0.085	0.1130	0.344	0.894
全磷 Total phosphorus	高斯 Gaussian	0.002	0.019	0.8949	0.621	0.105
全钾 Total potassium	球面 Spherical	3.491	5.211	0.1140	0.782	0.670
速效磷 Available phosphorus	球面 Spherical	84.300	84.400	0.1210	0.322	0.999
速效钾 Available potassium	高斯 Gaussian	2323.000	2346.000	0.1126	0.595	0.990
碱解氮 Available nitrogen	线性 Linear	34.177	416.029	0.5387	0.732	0.082

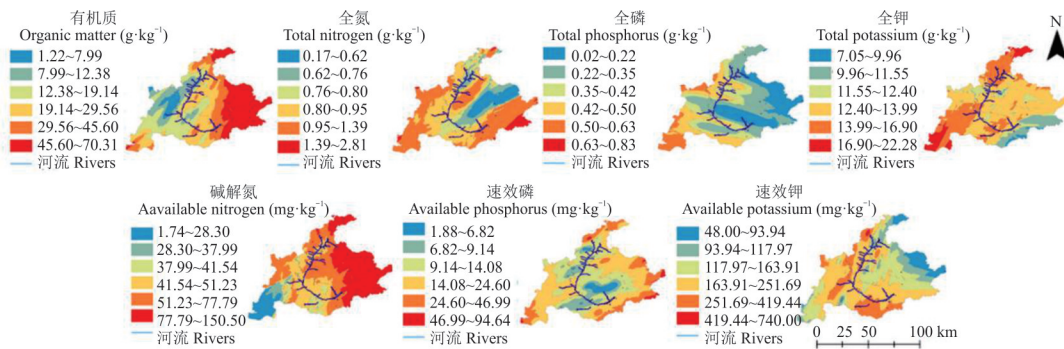


图 2 0–10 cm 土层相关指标空间分布规律

Fig. 2 Spatial distribution pattern of relevant indicators in 0–10 cm soil layer

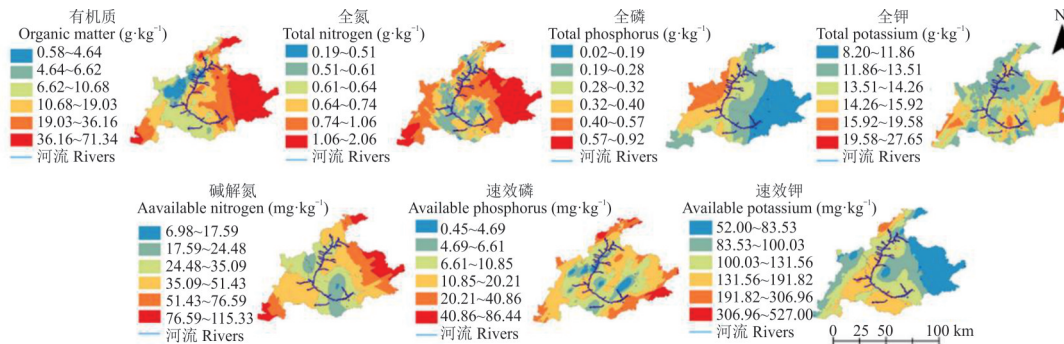


图 3 10–20 cm 土层相关指标的空间分布规律

Fig. 3 Spatial distribution pattern of relevant indicators in 10–20 cm soil layer

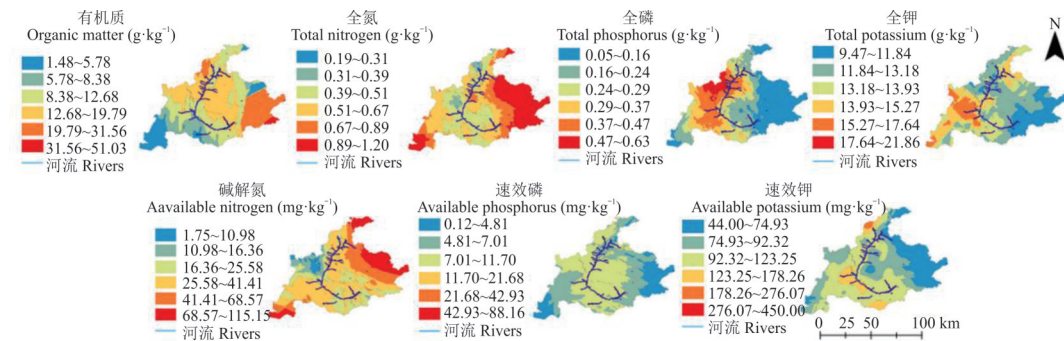


图 4 20–30 cm 土层相关指标空间分布规律

Fig. 4 Spatial distribution pattern of relevant indicators in 20–30 cm soil layer

在 10~20 cm 土层中,全氮和碱解氮含量变化大致呈西部、东部高,其余偏低的趋势;全磷和速效钾含量变化趋势由团块状分布转化为带状分布;其余各指标的含量变化趋势与 0~10 cm 土层相比,变化不大。

在 20~30 cm 土层中,各相关指标的含量变小,表明该土层中的养分质量变差。有机质的含量变化在方向上依然呈现东高西低的空间变异趋势,并且其极性分布趋势有所减弱;速效磷的含量变化趋势由团块状分布转化为中部高,其余偏低的趋势;其余各指标的含量变化趋势与 20~30 cm 土层相比,变化不大。

2.4 化学性状指标的空间集聚特征分析

2.4.1 全局空间自相关 以汾河上游附近的 132 个行政乡镇为评价单元进行研究,将插值结果的平均值连接到评价单元,通过 ArcGIS 10.8 软件计算得到全局 Moran's I 指数,探究相关指标空间分布的整体集聚特征。汾河上游地区土壤养分相关指标均为极显著空间正相关,说明采样点位置相关指标含量与邻近采样点接近,具有明显的局部空间集聚特征^[24]。

在 0~10 cm 土层中,汾河上游地区土壤养分相关化学性状指标空间相关性大小顺序依次为全钾>全氮>全磷>碱解氮>速效钾>有机质>速效磷,且均为极显著空间正相关(Moran's $I > 0, P < 0.01, Z > 2.58$)。速效磷的全局 Moran's I 值最小,且明显小于其他相关指标,表明其空间正相关性相对较弱,在空间上的集聚特征较弱(表 5)。

在 10~20 cm 土层中(表 6),各相关指标均为极显著空间正相关(Moran's $I > 0, P < 0.01, Z > 2.58$),空间相关性大小顺序由全钾最高转变为全氮最高,其余指标大小顺序与 0~10 cm 土层相同。与 0~10 cm 土层相比,除有机质、全氮和速效钾外,其余各指标空间自相关性均呈下降趋势,且速效磷的空间自相关性明显低于其他相关指标。

表 5 0~10 cm 土层相关指标的全局空间自相关

Table 5 Global spatial autocorrelation of relevant indicators in 0-10 cm soil layer

指标 Index	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Available nitrogen	全磷 Total phosphorus	速效磷 Available phosphorus	全钾 Total potassium	速效钾 Available potassium
全局 Moran's I Global Moran's I	0.2658	0.4474	0.3960	0.4362	0.1370	0.4622	0.2828
期望值 Expectations	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076
Z 得分 Z-score	5.2587	8.5908	7.6456	8.3317	3.2968	8.7899	5.6114
P 检验 P-test	0	0	0	0	0	0	0

表 6 10~20 cm 土层相关指标的全局空间自相关

Table 6 Global spatial autocorrelation of relevant indicators in 10-20 cm soil layer

指标 Index	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Available nitrogen	全磷 Total phosphorus	速效磷 Available phosphorus	全钾 Total potassium	速效钾 Available potassium
全局 Moran's I Global Moran's I	0.2833	0.4605	0.3704	0.3920	0.1237	0.4313	0.3225
期望值 Expectations	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076
Z 得分 Z-score	6.0331	8.8491	7.2553	7.5594	3.1378	8.2096	6.5015
P 检验 P-test	0	0	0	0	0	0	0

在 20~30 cm 土层中(表 7),汾河上游地区土壤养分相关指标均为极显著空间正相关(Moran's $I > 0, P < 0.01, Z > 2.58$)。与 0~10 cm 土层相比,除有机质和碱解氮的空间自相关大小顺序发生互换之外,其余指标大小排列无变化。与 10~20 cm 土层相比,除有机质、全磷和全钾外,其余指标空间自相关性均呈下降趋势,速效磷的全局 Moran's I 值依然呈较小的状态。

表7 20~30 cm 土层相关指标的全局空间自相关

Table 7 Global spatial autocorrelation of relevant indicators in 20~30 cm soil layer

指标 Index	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Available nitrogen	全磷 Total phosphorus	速效磷 Available phosphorus	全钾 Total potassium	速效钾 Available potassium
全局 Moran's <i>I</i> Global Moran's <i>I</i>	0.3583	0.4340	0.2966	0.4214	0.1165	0.4578	0.3123
期望值 Expectations	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076
Z得分 Z-score	7.1145	8.3263	5.9307	8.0531	3.2930	8.6996	6.3315
P检验 P-test	0	0	0	0	0	0	0

2.4.2 相关指标的空间聚类分析 在全局空间自相关结果的研究基础之上,为深入探究相关养分指标在小尺度局部地区的演变规律,通过 ArcGIS 10.8 软件计算得到局部 Moran's *I* 指数,形成空间集聚分布特征图(图5~7)。

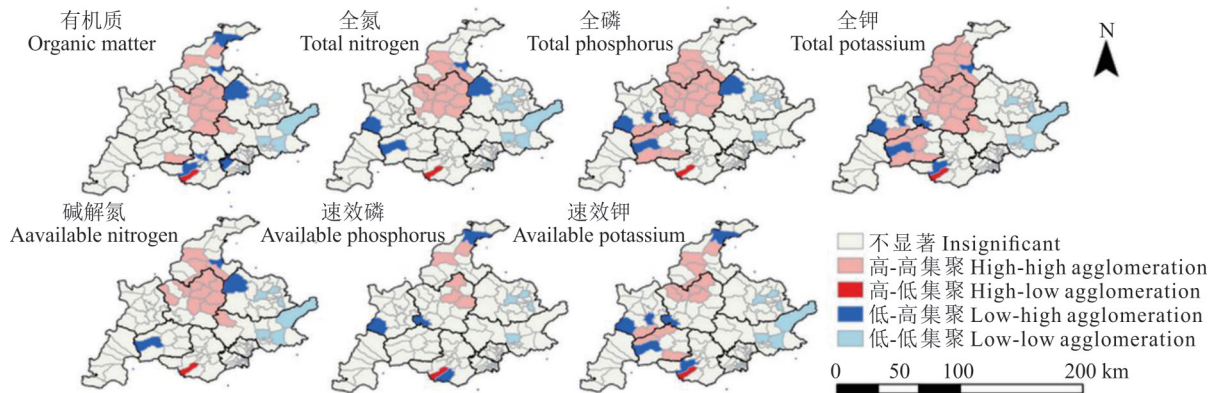


图5 0~10 cm 土层相关指标空间集聚分布特征

Fig. 5 Spatial clustering distribution characteristics of relevant indicators in 0~10 cm soil layer

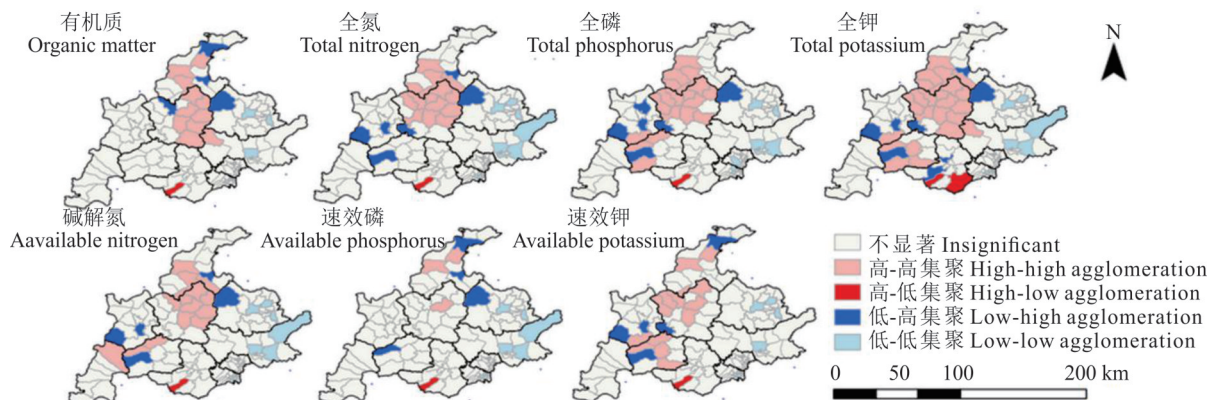


图6 10~20 cm 土层相关指标空间集聚分布特征

Fig. 6 Spatial clustering distribution characteristics of relevant indicators in 10~20 cm soil layer

结果表明(图5),0~10 cm 土层各指标的高-高集聚区主要分布于宁武县南部和静乐县北部,低-低集聚区主要分布于东部距离河流较远地区,高-低集聚区和低-高集聚区的空间集聚特征较为分散,在汾河上游各地区都有零散分布。

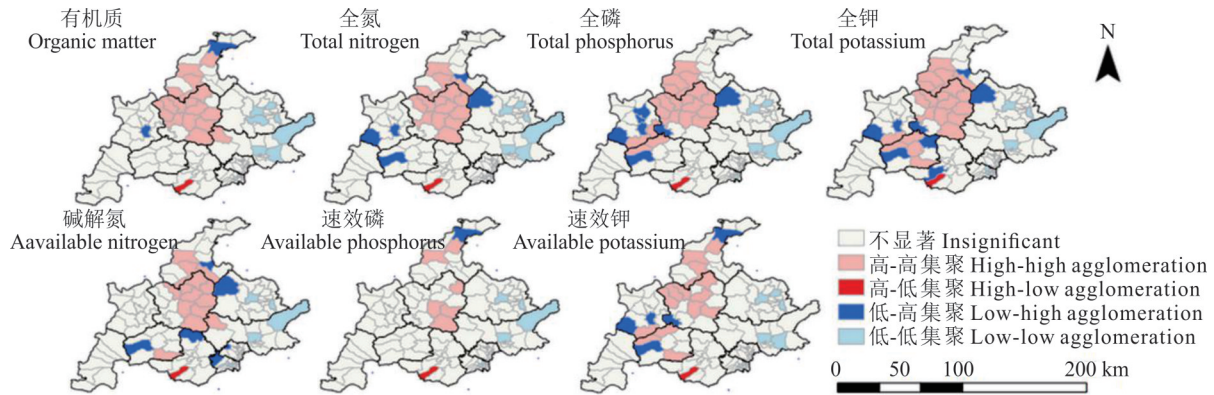


图 7 20~30 cm 土层相关指标空间集聚分布特征

Fig. 7 Spatial clustering distribution characteristics of relevant indicators in 20~30 cm soil layer

10~20 cm 土层各指标的空间集聚特征与 0~10 cm 土层相似(图 6),主要区别在于全钾的高一低集聚区域覆盖范围增加;全氮的低一高集聚区域覆盖范围增加;速效磷的高一高集聚区域覆盖范围减小;速效钾的高一高集聚区域覆盖范围增加。

与 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层相比(图 7),20~30 cm 土层各指标的空间集聚特征变化较小,高一高集聚区域仍然主要分布在宁武县南部和静乐县北部。3 个土层中速效磷和速效钾的空间集聚状态较为分散,且不同土层各指标的高一低集聚区域分布位置接近相同。

3 讨论

在空间变异特征方面,各指标的空间自相关性较弱,其变异特征受自然因素和人类活动等随机因素共同影响,土壤养分具有异质化变异趋势^[25]。和浅层土壤相比,深层土壤受地形等自然条件因素影响较小,其空间自相关性有进一步变弱的趋势。土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾的块基比在各个土层中数值较大,表明其更容易受到人类活动等随机因素的影响,这与姜霓雯等^[26]的研究结果类似。碱解氮在不同土层中的块基比相对较小,在分布规律图上空间连续性较小,呈小块斑状聚集分布,在小范围内具有中等程度的空间自相关性,这与童童等^[27]的研究结果相似。全磷和全钾的变程和块基比在不同土层中的变化规律差异较大,下一步研究可以通过增加样点数量的方式,更准确地了解影响全磷和全钾空间分布的因素。由于各指标的研究结果与样地尺度范围密切相关^[28],当样地尺度范围明显大于土地利用类型以及地形等自然条件分布的尺度范围时,空间变异特征更偏向于受结构性因素影响较大,部分有关采样密度的试验已经证实了这一点^[29-31]。根据聚类分析结果可知,该研究中,全磷以及碱解氮含量是影响土壤健康及植被生物量的关键指标,其与土地利用方式密切相关^[32],针对全磷及碱解氮含量偏低的区域实行牧草轮作和间套种植等模式,能够有效改善土壤质地并提高养分含量^[33-34]。研究结果中,多数指标的拟合模型具有较高的决定系数,表明拟合模型能够较好地反映土壤的空间特征。

在空间集聚特征方面,与养分相关的土壤性状指标均表现为显著的空间正相关。其中,全局空间自相关明确了各指标的空间相关性与规律性,局部空间自相关则进一步展示了各指标的具体空间集聚状态^[35]。研究期间,不同土层不同指标间的空间自相关性规律较为明显(表 5~7),其中,0~10 cm 土层各指标空间集聚性整体相对较高,10~20 cm 土层和 20~30 cm 土层空间集聚性有所下降,空间正相关性也出现弱化。这可能是由于较深土层根系较少,养分的循环利用能力较差。此外,根据聚类分析显示的结果可以看出,汾河上游草地生态系统的土壤健康水平较低主要是由全磷及碱解氮的匮乏引起的。有机质的高一高集聚区域主要分布在研究区北部等源头地区,且有少量的低一高集聚区域。全氮、全磷、全钾和碱解氮的集聚特征较为集中,高一高集聚区域主要分布在宁武县南部和静乐县,低一高集聚区域主要在西南方向呈零散分布。速效磷的空间集聚特征较为分散,在汾河上游各地区都有零散分布,且空间相关性相对较弱。速效钾的高一高集聚区域分布在汾河上游北部和西岸。各指标的高一低集聚区域较少,主要位于研究区南部,且分布位置几乎相同。各指标的低一低集聚区域主要分布在距离

汾河较远的研究区东部,这可能是距离河岸地区降水较少的缘故。随着土层的加深,各指标的空间集聚特征没有明显变化。

本研究系统分析了汾河上游草地生态系统的土壤养分空间特征,并通过地统计分析研究土壤养分相关化学性状指标变异特征的空间自相关水平,采用莫兰指数探究土壤养分相关化学性状指标集聚特征的空间自相关水平,结果较为准确,可为该地区退化草地修复提供参考依据。但本试验在研究方法上,还存在一些不足。1)在草地生态系统中,除了草地退化土壤化学性状指标外,物理性状指标和生物性状指标也影响区域生态系统土壤健康水平^[36],本研究主要从化学性状指标来分析汾河上游流域的草地土壤养分空间特征具有一定的局限性。2)虽然本研究以行政乡镇为评价单元进行研究,但近年来随着GIS技术的提升,全国各省村庄和社区的边界矢量数据逐渐丰富,以村庄和社区为评价单元进行土壤调查和指标评价具有更高的准确性。3)由于汾河上游流域研究区所处面积较大、土地利用类型交错分布,应继续优化采样点位置和采样点数量,最大限度地提高试验准确性。

4 结论

研究区草地土壤属弱碱性,自然含水率较低,全磷及碱解氮储量相对匮乏,汾河上游源头附近和尾端靠近干流附近草原点养分状况相对较好,中部及其支流附近草原点养分状况较差。各指标在不同土层的最优拟合模型主要为高斯模型,其次为球面模型和指数模型。速效磷和速效钾在不同土层中均具有较弱的空间自相关性,其余指标在不同土层之间的空间自相关程度差异较大,土壤养分指标的空间变异主要受结构因素和人类活动等随机因素共同影响。各指标在水平方向上的变化规律存在较大差异。垂直方向上,土壤养分相关指标的含量具有逐渐减少的趋势。集聚特征方面,各指标均为极显著空间正相关,全钾、全氮和全磷的空间自相关性强于碱解氮、速效钾、有机质和速效磷,且速效磷的空间自相关性明显低于其他指标。随着土层的加深,土壤有机质的空间相关性逐渐增强,碱解氮和速效磷的空间相关性逐渐减弱,其余指标无明显的变化规律。研究成果可以为山西省汾河上游区域退化草地修复与管理提供有效参考。

参考文献 References:

- [1] Dong S K, Zhang Y H, Wang G C. Assessment of grassland health and degradation: Concepts, principles and methods. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12): 2971—2981.
董世魁, 张宇豪, 王冠聪. 草地健康与退化评价: 概念、原理及方法. *草业科学*, 2023, 40(12): 2971—2981.
- [2] Wang Y F. Evaluation of soil conservation function of regional ecosystem in the upper reaches of Fenhe River. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
王怡帆. 汾河上游生态系统土壤保持功能评价. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [3] Fu W, Zhao K, Zhang C, *et al.* Using Moran's I and geostatistics to identify spatial patterns of soil nutrients in two different long-term phosphorus—application plots. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(5): 785—798.
- [4] Li Q Q, Wang C Q, Zhang W J, *et al.* Prediction of soil nutrients spatial distribution based on neural network model combined with geostatistics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 459—466.
李启权, 王昌全, 张文江, 等. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 459—466.
- [5] Wang X Y, Huang Y L, Quan B B, *et al.* Spatial variation characteristics and influencing factors of available nutrient elements in cultivated soil layers in Rui'an City, Zhejiang Province. *Geoscience*, 2022, 36(3): 963—971.
王学寅, 黄益灵, 全斌斌, 等. 浙江省瑞安市耕作层土壤养分元素有效态含量空间变异特征及其影响因素. *现代地质*, 2022, 36(3): 963—971.
- [6] Chen Q X, Lu X H, Tu C L. Spatial variation and influencing factors of soil pH in Anshun City. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2124—2132.
陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙. 安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析. *环境科学*, 2022, 43(4): 2124—2132.
- [7] Bei Q C, Thomas R, Beatrix S, *et al.* Extreme summers impact cropland and grassland soil microbiomes. *The ISME Journal*, 2023, 17(10): 1589—1600.
- [8] Seaton F M, Gaynor B, Annette B, *et al.* Soil health cluster analysis based on national monitoring of soil indicators. *European*

- Journal of Soil Science, 2020, 72(6): 2414–2429.
- [9] Fan X L, Lv X, Zhang Z, *et al.* Soil nutrient evaluation of cotton field based on distance clustering and K-means dynamic clustering. *Arid Zone Research*, 2021, 38(4): 980–989.
范向龙, 吕新, 张泽, 等. 基于距离聚类与 K-means 动态聚类的棉田土壤养分评价研究. *干旱区研究*, 2021, 38(4): 980–989.
- [10] Jiang X L. Comprehensive evaluation of soil nutrients geochemistry in Yongtai County based on principal component and cluster analysis. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 68–71.
江晓龙. 基于主成分和聚类分析的永泰县土壤养分地球化学综合评价. *安徽农业科学*, 2023, 51(1): 68–71.
- [11] Jin Z L, Chen M S, Shao L J, *et al.* Yongzhou tobacco-growing soil: Main chemical characteristics and cluster analysis. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(8): 37–41.
靳志丽, 陈梦思, 邵兰军, 等. 永州植烟土壤几种主要化学性状特征及聚类分析. *农学学报*, 2021, 11(8): 37–41.
- [12] Tan G J, Zhang S Y, Liu D P, *et al.* Habitat heterogeneity of grassland community characteristics in the Horchin elm sparse forest. *Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Science Edition)*, 2023, 38(4): 347–352.
谭国娟, 张淑艳, 刘殿鹏, 等. 科尔沁榆树疏林草原群落特征的生境分异性研究. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2023, 38(4): 347–352.
- [13] Hou L, Ma Y J, Wang G L, *et al.* Distribution of soil nutrient and its relationship with mechanical composition of abandoned farmland in the upper reaches of Fenhe River watershed. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(8): 1422–1427.
侯丽, 马义娟, 王国玲, 等. 汾河上游流域弃耕地土壤养分及其与机械组成的关系. *山西农业科学*, 2019, 47(8): 1422–1427.
- [14] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Li J, Zhang J Y, Wang R, *et al.* Comparison of determinations of available P of calcareous soil. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2017, 58(11): 31–33.
李娟, 张静月, 王蓉, 等. 两种石灰性土壤有效磷测定方法比较. *宁夏农林科技*, 2017, 58(11): 31–33.
- [16] Shang H Y, Qi J S, Mao S Y, *et al.* Correlation between two methods for determining soil available phosphorus and available potassium. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2010(5): 28–29.
尚海英, 祁居仕, 毛森煜, 等. 两种测定土壤有效磷和速效钾方法的相关性. *甘肃农业科技*, 2010(5): 28–29.
- [17] Guo H J, Cai Y P, Li B W, *et al.* An improved approach for evaluating landscape ecological risks and exploring its coupling coordination with ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348: 119277.
- [18] Han L L, Lu Y C, Ma W, *et al.* Spatial patterns of soil organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium in a subtropical forest and its implication for forest management. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(3): 417–427.
- [19] Qiu M, Zuo Q T, Wu Q S, *et al.* Water ecological security assessment and spatial autocorrelation analysis of prefectural regions involved in the Yellow River Basin. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): DOI: 10.1038/S41598-022-07656-9.
- [20] Liang Y L, Li J, Lu Y H, *et al.* Ecosystem service value evaluation and temporal-spatial evolution characteristics in an agro-pastoral ecotone of Gansu Province based on LUCC. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(5): 13–26.
梁赧亮, 李杰, 陆燕花, 等. 基于 LUCC 的甘肃省农牧交错带生态系统服务价值评估及时空演变特征研究. *草业学报*, 2023, 32(5): 13–26.
- [21] Zhang R T, Chen M. Spatial differentiation and driving mechanism of agricultural multifunctions in economically developed areas: A case study of Jiangsu Province, China. *Land*, 2022, 11(10): 1728.
- [22] Wu H Y, Jin R D, Fan Z W, *et al.* Assessment of fertility quality of black soil based on principal component and cluster analysis. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 325–334.
吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 325–334.
- [23] Zuo X H, Lai J X, Liu F, *et al.* Spatial heterogeneity and zoning of soil organic matter based on geostatistics and spatial autocorrelation: a perspective from land consolidation. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(3): 240–252.
左昕弘, 赖佳鑫, 刘峰, 等. 基于地统计学和空间自相关的土壤有机质空间异质性分析及分区——土地整治视角. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(3): 240–252.
- [24] Lei J R, Chen Z Z, Wu T T, *et al.* Spatial autocorrelation pattern analysis of land use and the value of ecosystem service in

northeast Hainan island. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2366–2377.

雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析. *生态学报*, 2019, 39(7): 2366–2377.

- [25] Zhao C Y, Liu Y Y, Shi X P, *et al.* Effects of soil nutrient variability and competitor identify on growth and co-existence among invasive alien and native clonal plants. *Environmental Pollution*, 2020, 261(C): 113894.
- [26] Jiang N W, Tong G P, Ye Z Q, *et al.* Spatial variability of soil fertility properties and its affecting factors of Qingliangfeng Nature Reserve, Zhejiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2430–2441.
姜霓雯, 童根平, 叶正钱, 等. 浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素. *生态学报*, 2022, 42(6): 2430–2441.
- [27] Tong T, Mei S, Liu Y, *et al.* Spatial variation of soil nutrient characteristics around Chaohu Lake based on GIS results. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1522–1531.
童童, 梅帅, 刘莹, 等. 基于 GIS 的环巢湖地区土壤养分空间变异特征研究. *农业环境科学学报*, 2023, 42(7): 1522–1531.
- [28] Wang T, Kang F F, Cheng X Q, *et al.* Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China. *Catena*, 2017, 155: 41–52.
- [29] Liu M J, Xu Z K, Gao Y B, *et al.* Estimating soil organic matter based on machine learning under sparse sample. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(9): 1799–1813.
刘明杰, 徐卓揆, 郜允兵, 等. 基于机器学习的稀疏样本下的土壤有机质估算方法. *地球信息科学学报*, 2020, 22(9): 1799–1813.
- [30] Yang J H, Liu M Y, Zhang J, *et al.* Spatial variability of soil nutrients and its affecting factors at small watershed in gully region of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 743–754.
杨静涵, 刘梦云, 张杰, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 743–754.
- [31] Niu W P, Li Q P, Li C, *et al.* Multi-scale spatial variability and environmental drivers of soil nutrient distributions in the Pearl River Delta, South China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(4): 743–755.
牛文鹏, 李青圃, 李铖, 等. 珠江三角洲土壤养分多尺度空间分异及环境驱动力. *生态环境学报*, 2021, 30(4): 743–755.
- [32] Gao G, Tuo D, Han X, *et al.* Effects of land-use patterns on soil carbon and nitrogen variations along revegetated hillslopes in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 746: 141156.
- [33] Rigon G P J, Calonego J C, Capuani S, *et al.* Soil organic C affected by dry-season management of no-till soybean crop rotations in the tropics. *Plant and Soil*, 2021, 462(1): 1–14.
- [34] Rui Y C, Jackson R D, Francesca M C, *et al.* Persistent soil carbon enhanced in mollisols by well-managed grasslands but not annual grain or dairy forage cropping systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(7): DOI: 10.1073/PNAS.2118931119.
- [35] Zhang H, Zhao X M, Ouyang Z C, *et al.* Spatial disparity features and protection zoning of cultivated land quality based on spatial autocorrelation—A case study of Shanggao County, Jiangxi Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(1): 304–312.
张晗, 赵小敏, 欧阳真程, 等. 基于空间自相关的耕地质量空间差异特征及耕地保护分区——以江西省上高县为例. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 304–312.
- [36] Wu Y G, Ulan T Y, Zhang W Q, *et al.* Analysis of the evolution of the grassland degradation evaluation index system in China based on CiteSpace. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(5): 125–136.
乌云嘎, 乌兰图雅, 张卫青, 等. 基于 CiteSpace 的中国草地退化评价指标体系演进分析. *中国草地学报*, 2023, 45(5): 125–136.