

DOI: 10.12401/j.nwg.2023088

# 塔里木盆地东北缘绿洲区土壤养分特征及 主控因素分析

刘靖宇<sup>1</sup>, 蒋磊<sup>1,\*</sup>, 尹立河<sup>2</sup>, 胡宏利<sup>1</sup>, 王龙龙<sup>1</sup>, 孙吉干<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830057; 2. 中国地质调查局  
西安地质调查中心, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 土壤健康关系人民生活水平, 关乎国家粮食安全, 是重要的战略资源。为摸清塔里木盆地东北缘典型绿洲区土壤养分特征, 采集研究区土壤表层样品 140 件, 测定主要养分元素含量, 分析其生态化学计量特征、空间分布规律及影响养分富集的主控因素。结果表明: ① 研究区 Fe、Mn 含量高值分布面积最广, Mg 含量高值分布范围最小; 分析土壤生态化学计量特征, 发现缺氮少磷是限制区内植物正常生长的主控因素。② 从数量上来看, 研究区贫瘠、极贫瘠级别的土地面积占总面积的 99.14%, 仅 0.86% 的土地处于中等级别水平。从空间分布上来看, 中等肥力的土地分布在区内东南部, 呈孤岛状; 极贫瘠的土地主要分布在绿洲-荒漠的过渡带上。③ 研究区 4 种土地利用方式中, 耕地的土壤养分含量较高; 土壤养分元素的含量与坡向、地表粗糙度呈正相关关系, 与海拔呈负相关关系。同时, 土壤养分的丰缺与长期连作、作物施肥、灌溉技术等人为影响也有着密切的关系。

**关键词:** 土壤; 养分; 塔里木盆地; 绿洲区; 主控因素

中图分类号: P595; X142

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0141-12

## Soil Nutrient Characteristics and Main Controlling Factors in the Oasis Zone of the Northeastern Margin of Tarim Basin

LIU Jingyu<sup>1</sup>, JIANG Lei<sup>1,\*</sup>, YIN Lihe<sup>2</sup>, HU Hongli<sup>1</sup>, WANG Longlong<sup>1</sup>, SUN Jigan<sup>1</sup>

(1. Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Urumqi 830057, Xinjiang, China;  
2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

**Abstract:** Soil health is related to people's production, living standards, and national food security and is an important strategic resource. To understand the nutrient characteristics of soils in typical oasis areas on the northeast edge of the Tarim basin. A total of 140 soil surface samples were collected from the study area to determine the content of major nutrient elements and analyze their ecological chemometric characteristics, spatial distribution patterns, and the main controlling factors affecting nutrient enrichment. The results showed that: ① High values of Fe and Mn were most widely distributed in the study area, while high values of Mg were the least widely distributed. Analysis of the ecological stoichiometric characteristics of the soil showed that the lack

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-04-18; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“环塔里木盆地绿洲区土壤盐渍化现状调查评价”(DD20220872), “南疆地区盐渍化区(巴州)生态地质调查”(DD20191026)和陕西省创新能力支撑计划(2019TD-040)联合资助。

作者简介: 刘靖宇(1992-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事资源与环境研究。E-mail: liujingyu@mail.cgs.gov.cn。

\* 通讯作者: 蒋磊(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事生态地质研究。E-mail: 394465421@qq.com。

of nitrogen and phosphorus was the main controlling factor limiting the normal growth of plants in the area.

② In terms of quantity, 99.14% of the total land area in the study area is infertile or very infertile, and only 0.86% of the land is at the medium-grade level. In terms of spatial distribution, the moderately fertile land is distributed in the south-eastern part of the district in the form of islands, and the very barren land is mainly distributed in the oasis-desert transition zone. ③ Among the four types of land use, the soil nutrient content of the arable land is higher. Meanwhile, the content of nutrient elements is positively correlated with slope orientation and surface roughness and negatively correlated with altitude. At the same time, the abundance of soil nutrients is also closely related to long-term continuous cropping, crop fertilization, irrigation techniques, and other anthropogenic influences.

**Keywords:** soil; nutrients; Tarim Basin; oasis zone; dominant control factors

中国作为农业大国,以占全世界7%的耕地养活了全世界22%的人口。但是受人类活动和全球气候变化的影响,部分地区土地质量持续退化。如何保障新时期国家粮食安全,助力后备耕地建设是目前土壤科学的首要研究任务。

土壤养分是衡量土地质量的重要定量指标(Khormali et al., 2009; Ayoubi et al., 2014)。近年来,众多学者围绕土壤养分特征、空间异质性及其生态化学计量特征进行了大量的研究。张子璐等(2020)运用地统计学与聚类分析相结合方法,分析了重庆西部丘陵区土壤中有效钾的空间分布特征。Dai等(2018)利用地统计学和莫兰指数等分析手段,揭示了浙江典型亚热带森林土壤中有有机碳、氮、磷、钾和pH的空间异质性,并对其影响因素进行了分析。Razan Malla等(2020)将GIS手段与克里金插值法结合,分析了土壤中全氮(TN)、有效磷(AP)、有效钾(AK)等元素的空间分布情况。Sharma Rakesh等(2020)利用多元统计分析手段,分析了印度中部黑土地中的土壤养分现状。朱平宗等(2020)系统分析了南方典型红土区不同植被类型的土壤生态化学计量特征。然而目前针对塔里木盆地的相关研究较为单一(李红林等, 2015; 黄彩变等, 2020),系统性的研究鲜有报道。

塔里木盆地位于新疆南部,是中国最大的荒漠区(图1),自然资源丰富、生态环境脆弱是区域典型特征。近年来,环塔里木盆地绿洲区受人口高速增长、农业产业布局扩大、农村城镇化建设加快的影响,区域土地质量日益恶化,严重制约了当地经济社会与生态环境的可持续发展(Zhang et al., 2012)。加之当地居民对于生态环境保护的意义认知不到位(李青等, 2018),农业生产和资源开发不合理也间接导致了土壤肥力的下降。基于此,笔者以塔里木盆地东北缘绿

洲区为研究对象,以农业土壤学为切入点,利用模糊综合评价法分析全氮(TN)、有机碳(Corg)、总碳(TC)、全钾(TK)、全磷(TP)、钼(Mo)、铁(Fe)、镁(Mg)和锰(Mn)等9种养分元素含量特征,同时对研究区土壤肥力状况评价;以土壤生态学为提升点,引入生态化学计量特征这一概念,揭示植物-土壤生态系统中养分元素的循环机制,进一步深化对干旱区土壤养分特征及影响因素的认识。同时,以数据分析为基准,采取定性定量相结合的方法,探讨土地利用方式、地形因子和人为因素等对土壤养分丰缺的影响,旨在为南疆地区土地资源合理开发利用和精准农业实施提供技术支撑。

## 1 区域背景

研究区位于塔里木盆地东北缘,塔里木河与孔雀河下游,是典型的沙漠绿洲区。行政区划归属新疆生产建设兵团农二师管辖,地理位置为E 86°51'~87°21', N 40°35'~40°58',面积约为864 km<sup>2</sup>。研究区属于暖温带大陆性干旱气候,多年平均气温为11.4℃,年均降水为50.7 mm,年均蒸发量为2730.3 mm,无霜期长达170 d。区内光照资源充足,热量丰富,四季分明,大风和风沙天较多。土壤以风沙土、沙壤土和粘壤盐土为主。区内地势较为平坦,地形复杂,土地利用效率较低。胡杨(*Populus euphratica*)、怪柳(*Tamarix chinensis* Lour)、罗布麻(*Apocynum venetum*)和骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)等是区域生长的典型原生植物。依托特有的水土、光热、地缘和物种等资源,研究区形成了内容丰富、特色明显的“棉、梨、枣、杏、啤酒花、马鹿”等优势产业集群,规模化、品牌化的区域产业布局已初具规模。“特色高效农业示范区”、

“中国最大的塔里木马鹿养殖基地”、“库尔勒香梨生产基地”和“全国主要的优质棉生产基地”等一

批国家级重点特色区域的建成,为当地社会经济发展注入了强大活力。

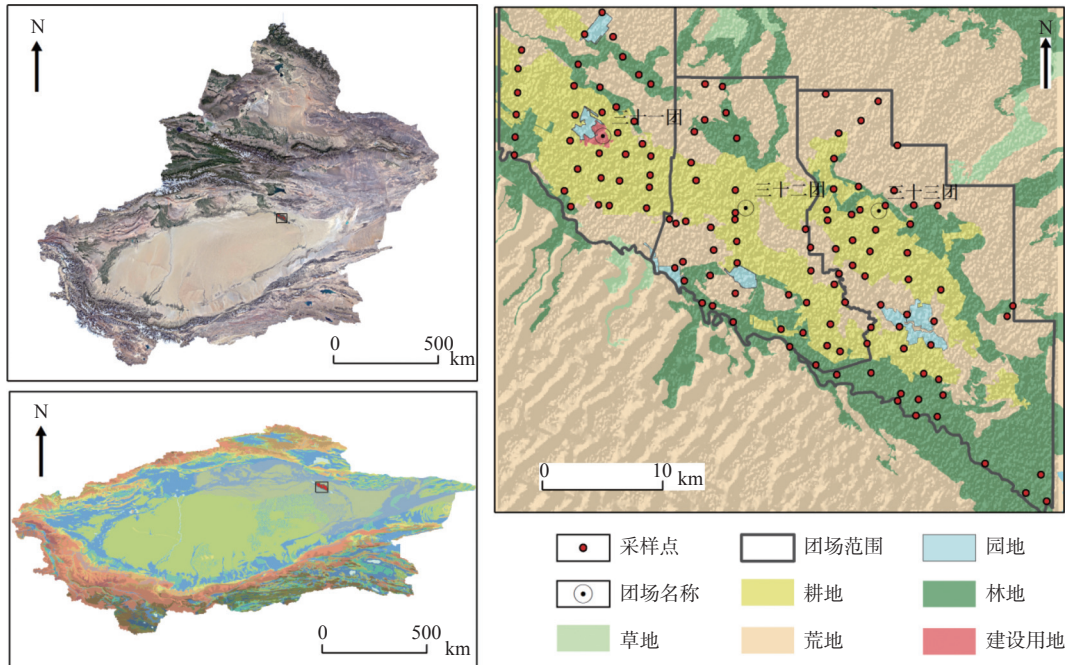


图1 研究区与采样点位置图

Fig. 1 Location map of the study area and the sampling point

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与处理

2020年6~8月,在研究区采集表层(0~30 cm)土壤样品140件。实际采样中,结合具体地形条件,综合考虑采样点的随机性和代表性(图1),同步使用手持GPS记录每个采样点的坐标、环境信息、作物信息及其他特殊情况。使用美国AMS公司生产的土壤取样器均匀采集样品3kg,去掉肉眼可见的动植物残体、地表凋落物等,均匀混合后装入样品袋贴好标签保存。样品带回室内经自然风干、研磨、过筛等步骤后装入无尘样品袋待测。

样品的分析测试在新疆有色地质勘查局测试中心进行,标准参照《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T0279—2016)。其中,Corg使用总铬酸钾容量法测定,TC使用燃烧-红外吸收光谱法,TN使用凯氏定氮法测定,Mg使用电感耦合等离子光谱法测定,TP、TK、Fe和Mn元素使用X射线荧光光谱法测定,Mo使用电感耦合等离子体质谱法测定。按照要求抽取5%的样品进行重复性和异常值检验,结果均符合要求。

### 2.2 数据处理

利用Excel进行数据的预处理。采用SPSS 24.0软件对数据进行描述性统计,使用ANOVA方差分析模块进行生态化学计量特征解析。利用GS+9.0软件调节不同模型参数进行半变异函数的模型拟合;利用ArcGIS 10.2软件中的地统计模块进行Kriging插值和交叉验证,并绘制土壤养分和肥力的空间分布图。利用Origin 2019和Canoco 5.0软件分析不同土地利用类型、地形因子对于土壤养分的影响。

### 2.3 分析方法

#### 2.3.1 半方差拟合模型

主要用于描述区域化变量空间连续变异性,是Kriging插值的基础(张慧文等,2009;贾鲁净等,2022)。具体函数表达式为:

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

式中: $r(h)$ 表示与采样间距相关的半方差函数; $h$ 为采样点的间距,即步长; $N(h)$ 表示采样间隔为 $h$ 的样本点的成对数; $Z(x_i)$ 与 $Z(x_i+h)$ 分别表示在 $x_i$ 点位置与 $x_i+h$ 点位置处的土壤养分值。

#### 2.3.2 土壤肥力综合评价

(1)各评价因子隶属度的计算

文中引入隶属度概念(李美娟等, 2004), 对原始数据进行标准化处理。对于正向指标和负向指标的具体数据处理方法如下:

$$\text{正向指标: } Q_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (2)$$

$$\text{负向指标: } Q_{ij} = \frac{X_{i\max} - X_{ij}}{X_{i\max} - X_{i\min}} \quad (3)$$

式中:  $Q(x_i)$  表示土壤养分元素的隶属度值,  $x_{ij}$  表示元素的实测值,  $x_{i\max}$  和  $x_{i\min}$  分别表示第  $i$  项元素的最大值与最小值。因所测均为土壤养分元素, 是反映土壤肥力等级的重要指标, 因此使用正向指标计算公式。

(2) 各评价因子权重系数的确定

① 计算第  $j$  项指标在第  $i$  个样品中占该指标的比重:

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}} \quad (4)$$

② 第  $j$  项指标(列)的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

式中:  $k = \frac{1}{\ln(n)}$ , 且满足  $0 \leq e_j < 1$

③ 第  $j$  项指标(列)的差异系数:

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

④ 第  $j$  项指标(列)的权重:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (7)$$

(3) 土壤肥力综合评价指数

根据模糊数学法的计算原则, 土壤肥力综合评价指标计算公式如下(赵敬坤等, 2021; 冯博等, 2022):

$$IFI = \sum_{i=1}^n Q(x_{ij}) \times W_j \quad (8)$$

式中:  $IFI$  是土壤肥力综合评价指数,  $Q(x_{ij})$  是各个评价因子的隶属度值,  $W_j$  是第  $j$  个评价指标的权重,  $n$  是土壤样品的个数。

### 3 研究结果

#### 3.1 土壤养分的描述性统计

采用阈值法识别特异值(陶睿等, 2017), 根据 K-S 模型对数据进行正态分布检验, 发现各元素均不同程度的存在偏斜态, 对 Mo、Mn 和 TP 作对数变换, TN、Corg、TC、TK、Fe 和 Mg 作平方差变换, 转换后各养分元素均符合正态分布(表 1)。

表 1 描述统计相关参数表(n=140)

Tab. 1 Describes the statistically related parameters (n=140)

元素	最小值	最大值	均值	标准偏差	偏度	峰度	变异系数(%)	正态分布
TN	0.01	0.13	0.04	0.02	1.12	2.18	0.47	平方差
Corg	0.06	1.83	0.43	0.29	1.50	3.65	0.68	平方差
TC	1.15	3.45	2.45	0.47	0.00	-0.66	0.19	平方差
Mo	0.37	2.04	0.82	0.30	1.29	2.37	0.37	对数
Fe	1.70	5.06	3.10	0.67	0.48	-0.44	0.22	平方差
TK	1.23	2.79	2.20	0.22	-0.37	2.88	0.10	平方差
Mg	1.38	4.49	2.77	0.62	0.34	-0.28	0.22	平方差
Mn	261.63	732.43	480.49	93.39	0.42	-0.32	0.19	对数
TP	336.08	869.40	557.23	109.32	0.56	0.26	0.20	对数

注: TN、Corg、TC、TK、Fe、Mg 含量为%; Mo、Mn、TP 含量为  $10^{-6}$ 。

参照第二次全国土壤普查养分分类标准(表 2)(田立文等, 2020), 对研究区的全量元素和有机碳进行分级, 其中 TN 含量均值达到了六级水平, 最大值为三级水平, 反映了研究区的 N 处于缺乏状态。根据土壤有机质与有机碳的转换关系(鲍士旦等, 2008), 可知研究区的 Corg 均值处于五级水平, 最大值处于三级水平, 说明区内部分土地处于碳缺乏状态。TP 的

含量均值处于四级水平, 最大值处于二级水平, 整体含量符合正常水平; TK 元素的含量均值处于二级水平, 最大值处于一级水平, 整体含量丰富。研究区内土壤养分元素的变异程度大小依次为 Corg > TN > Mo > Fe = Mg > TP > TC = Mn > TK。除 K 外, 其余元素均表现出了中等程度的变异, 说明各元素在空间上分布并不是很均匀, 与地理空间位置存在一定的关



表2 第二次全国土壤普查土壤养分分级标准表

Tab. 2 Soil nutrient classification standards for the second national soil survey

	一级	二级	三级	四级	五级	六级
TN	> 40	1.5~2	1~1.5	0.75~1	0.5~0.75	< 0.5
TP	> 1	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	< 0.2
TK	> 25	20~25	15~20	10~15	5~10	< 5
有机质	> 40	30~40	20~30	10~20	6~10	< 6

注:元素含量均为%。

联性。

### 3.2 土壤养分空间分布特征

块金值( $C_0$ )反映了实际采样中由于采样误差、测量误差等随机因素产生的空间变化;基台值( $C_0+C$ )反映了土壤母质、地形等结构因素引起的空间变化;变程( $R$ )代表了变量的影响区域。块金比( $C_0/C_0+C$ )可以直接反映变量的空间相关性程度(刘庆等, 2007; 贾佳瑜等, 2021)。当块金比>0.75时,代表空间相关性较弱;当块金比为0.25~0.75时,呈中等相关关系;而当块金比<0.25时,表明具有较强的空间相关性。残差平方和( $RSS$ )和决定系数( $R^2$ )是衡量半变异函数拟合效果的重要指标,当 $R^2$ 越大, $RSS$ 越小时,说明数据

拟合效果越好(陶于祥等, 2018; 杨阳等, 2021)。

研究区各元素的空间相关性大小关系为 $Fe > TK > Mg > Mo > TC > TN > TP > Corg > Mn$ ,且所有养分元素的块金比均大于0.75(表3),呈弱相关关系,说明随机因素对土壤中养分元素含量的影响占主导地位。由于研究区地处城乡发展结合区,人为活动对土壤养分影响较大,前人研究也证实了这一点(廖启林等, 2012)。对比各养分元素的 $RSS$ 值和 $R^2$ 值,参考相关文献资料(闫金凤等, 2006),可知TN、Corg和TK的拟合程度最好。综上所述,TN、Corg、TK、Mo和Mg选用指数模型,TC、TP和Mn选用球状模型,Fe选用高斯模型。

表3 半方差函数相关参数表

Tab. 3 Related parameters of the half-variance function

元素	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	块金比 $C_0/C_0+C$	变程 $R$	决定系数 $R^2$	残差 $RSS$	模型
TN	1.21E-04	2.04E-03	0.941	4 170.00	0.74	2.49E-09	指数模型
Corg	0.002 5	0.044 5	0.944	4 770.00	0.70	1.07E-04	指数模型
TC	0.001 6	0.023 7	0.933	4 800.00	0.21	1.43E-05	球状模型
Mo	0.007 9	0.110 8	0.929	3 420.00	0.27	1.72E-04	指数模型
Fe	0.005 2	0.034	0.848	2 390.23	0.49	8.81E-06	高斯模型
TK	7.80E-04	5.72E-03	0.864	4 710.00	0.79	7.61E-08	指数模型
Mg	0.004 3	0.035 4	0.880	2 760.00	0.21	6.25E-05	指数模型
Mn	0.000 8	0.036 8	0.978	2 720.00	0.54	6.57E-06	球状模型
TP	0.002 2	0.038 2	0.942	2 810.00	0.35	2.86E-05	球状模型

基于表3的相关参数及最优拟合模型,在ArcGIS 10.2中绘制了各养分元素的空间分布图。TN、Corg、Mo和Mg具有一致的空间分布规律(图2),在整个研究区含量普遍较低,特别是Mg的含量低值区范围最大,Mo在区内西北部和东南部出现小范围的含量相对高值区。TC、Fe、Mn、TP和TK的含量高值区分布面积较广,基本覆盖了整个研究区。其中,以Fe、Mn最为富集,TK含量高值的面

积相对较小。研究发现,东南方向为各养分元素聚集的主要区域,其次为西北部,中部地区土壤的养分元素含量值普遍较低,可能与东南方向农业较为发达有关。规模化的农业种植需要大量的人为干预(肥料施用等),从而导致了部分养分元素的局部富集,同时这也与研究区的土地利用类型和地形因子有一定的内在联系(赵雯等, 2022; 陈金萍等, 2022)。

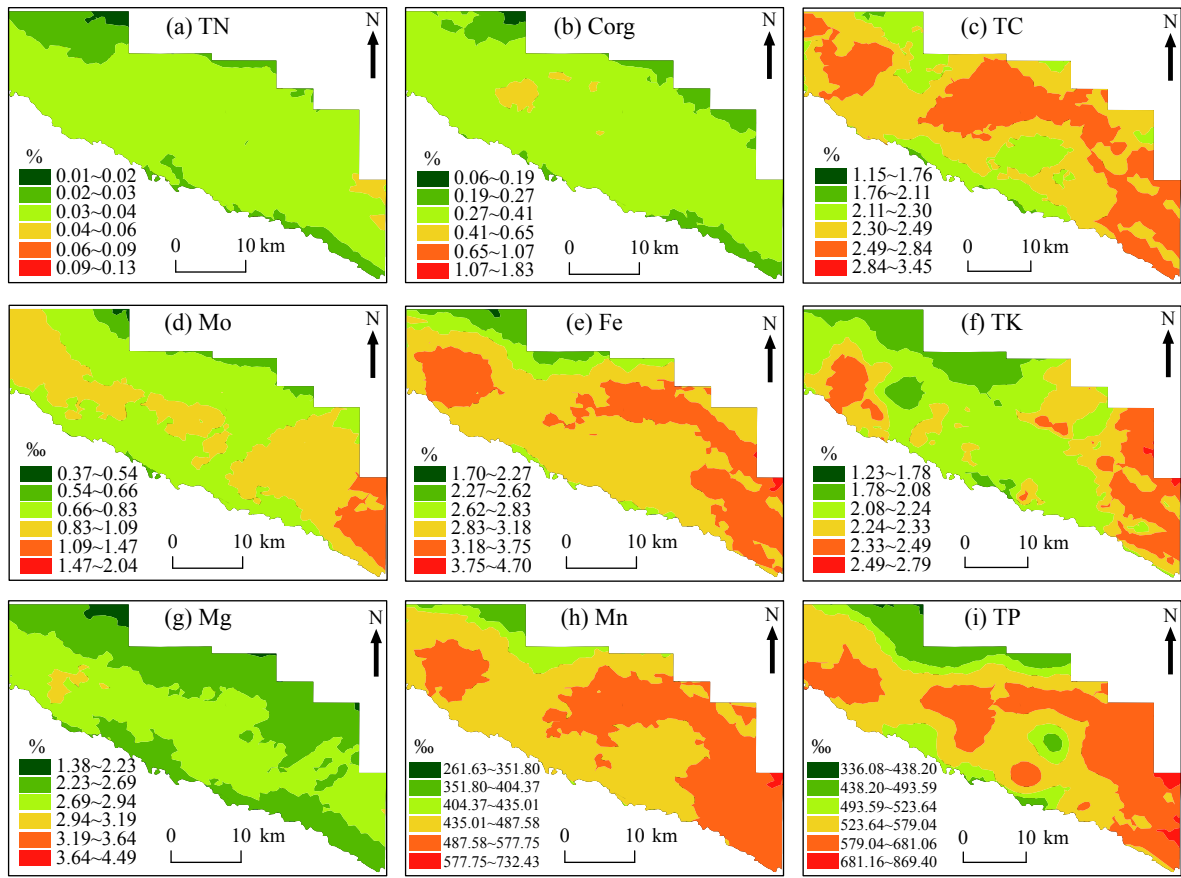


图2 土壤养分元素的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of the soil nutrient elements

### 3.3 土壤肥力评价

目前,等级法(宋铮等, 2020)和指数法(能子礼超等, 2020)是评价土壤肥力的两种主要指标体系,这两种评价方法虽简单直观,但其评价结果的准确性还需提高。因此,笔者将多元统计学、模糊数学法和插值法相结合,通过大量数据的处理,定量分析土壤表层的肥力等级状况(贺思楠等, 2022)。避免人为主观因素对评价结果的影响,采用熵值法确定权重(田鸽, 2021)。根据其计算方法,利用各采样点养分元素的实测值,计算相应的信息熵,并得到各土壤肥力评价

指标的权重表(表4)。

根据模糊数学的计算原则,利用土壤养分元素含量计算肥力综合得分,得分越高,说明土壤肥力的综合程度越高,反之越低(Cheng et al., 2020)。前人将土壤肥力状况分为肥沃、较肥沃、中等、贫瘠和极贫瘠共5个等级(Li et al., 2021),研究区土壤肥力综合评价指数(IFI)值为0.05~0.69,均值为0.3277,标准差为0.1383,说明区内土壤肥力处于贫瘠水平。研究区贫瘠、极贫瘠土地面积占总面积的99.14%,仅0.86%的土地处于中等水平(表5),也反映了土壤肥力整体

表4 土壤养分元素的权重表

Tab. 4 Weights of soil nutrient elements

元素	TN	Corg	TC	Mo	Fe	TK	Mg	Mn	TP
权重	0.1995	0.2254	0.0537	0.1622	0.0885	0.0219	0.0799	0.0715	0.0974

表5 肥力等级及面积占比表

Tab. 5 Fertility grade and area ratio

土壤肥力等级	肥沃F1	较肥沃F2	中等F3	贫瘠F4	极贫瘠F5
IFI	≥0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	≤0.2
面积占比	0	0	0.86%	89.64%	9.50%

较为贫瘠。

通过各样点地理坐标和计算得出的IFI指数,绘制了研究区土壤肥力的空间分布图(Xiao et al., 2013)。贫瘠土地的面积占区内总面积的90%以上(图3),土壤肥力等级以贫瘠为主,沿西北-东南方向贯穿整个研究区。中等肥力的土地仅分布在区内东南部,未形成大面积的集中连片区,呈孤岛状分布。极贫瘠的土地主要分布在研究区的边界带上,这部分地区主要处于绿洲-荒漠过渡带,环境条件恶劣,生态质量差,人迹活动少,导致了土壤中养分元素的流失。

### 3.4 土壤生态化学计量特征

土壤生态系统的化学计量学特征对于探讨“植物-凋落物-土壤”养分循环的调控机制、揭示元素平衡、分析生态要素交互作用具有重要意义(Li et al., 2022),同时还能揭示土壤养分的可获得性及其限制因子,广泛应用于植物个体生长、种群动态、群落演替、限制性元素判断、生态系统稳定性等研究领域(朱平宗等, 2020)。

采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析

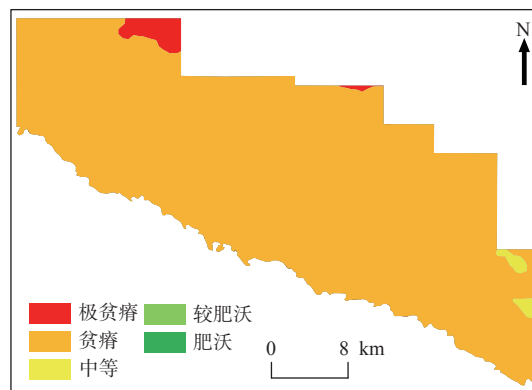


图3 土壤养分肥力空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of soil nutrient fertility

不同土地利用类型间的土壤生态化学计量特征的差异。区内林地的 $wC:wN$ 、 $wC:wP$ 值与其他3种土地利用方式的差异显著( $P < 0.05$ ),园地、林地的 $wN:wP$ 值与耕地、荒地差异显著( $P < 0.05$ )(表6)。4种土地利用方式中, $wC:wN$ 值大小依次为林地>耕地>荒地>园地; $wC:wP$ 值大小依次为林地>园地>荒地>耕地; $wN:wP$ 值大小依次为园地>林地>耕地=荒地。

表6 不同土地利用方式间土壤生态化学计量特征表

Tab. 6 Soil ecological stoichiometry of different land use methods

生态化学计量比	耕地	园地	林地	荒地
$wC:wN$	69.20±15.20 <sup>ab</sup>	65.17±10.85 <sup>a</sup>	74.31±12.32 <sup>b</sup>	68.73±10.32 <sup>a</sup>
$wC:wP$	42.99±5.70 <sup>a</sup>	45.20±7.09 <sup>ab</sup>	46.06±7.22 <sup>b</sup>	44.32±5.90 <sup>a</sup>
$wN:wP$	0.71±0.11 <sup>a</sup>	0.73±0.11 <sup>b</sup>	0.72±0.08 <sup>ab</sup>	0.71±0.11 <sup>a</sup>

注:表中数据为平均值±标准差,不同小写字母表示不同土地利用方式土壤生态化学计量特征差异显著。

土壤 $wC:wN$ 、 $wC:wP$ 和 $wN:wP$ 值是反映土壤有机质组成和质量程度的重要指标,其大小主要受区域水热条件和土壤母质层的风化作用控制(朱平宗等, 2020)。其中, $wC:wN$ 值反映微生物利用土壤有机质的有效性,区内土壤的 $wC:wN$ 值高于全国平均值(11.90)(Tian et al., 2010),表明有机质的矿化过程较慢,这与研究区的干旱气候有关(黄锦学等, 2017)。 $wC:wP$ 值反映微生物对P的代谢趋势,区内土壤的 $wC:wP$ 值低于全国平均值(52.7)(Tian et al., 2010)。其中,耕地土壤的 $wC:wP$ 值要大于林地、园地,可能与耕地的肥料使用有关。同时,在荒地到园地再到林地的正向演替过程中, $wC:wP$ 值呈增大趋势,说明随着植被的演替,土壤有机质不断增加,但土壤P的有效性在降低,区域土壤P偏低的环境逐步成为植被生

长的限制性因素。 $wN:wP$ 值反映土壤中氮和磷对植被生长的限制作用。区内土壤的 $wN:wP$ 值低于全国平均值(3.9)(Cory et al., 2007),研究区TN含量低于全国土壤背景值,表明区内土壤N缺乏。相关研究表明,N与P表现为极显著的正相关关系,也说明了区内土壤P的匮乏。

## 4 讨论

为分析影响土壤养分分布和聚集的因素,笔者选取土地利用方式、地形因子和人为活动3个方面进行讨论。

### 4.1 不同土地利用下对土壤养分的影响

TN、TC与TK具有较为一致的分佈态势(图4),

各土地利用方式间差异不显著。4种土地利用类型, Corg含量均值大小为耕地>园地>荒地>林地, 相差均在5%以内; Mg含量均值大小为耕地>林地>荒地>园地, 其中荒地和园地间的差异不显著, 差值小于2%; TP均值大小依次为耕地>园地>林地>荒地, 其中园地、林地和荒地的差异不显著; Mn含量均值大小为耕地>林地>荒地>园地, 其中耕地、林地和荒地间差异较小; Fe含量均值大小为耕地>荒

地>林地>园地, 荒地、林地与耕地、园地的差异较大; Mo含量均值大小为园地>荒地>耕地>林地, 其中荒地、耕地和林地的差异较小, 与园地的差异显著。综上所述, 研究区耕地的土壤养分含量整体较高, 原因可能是在种植农作物过程中肥料大量使用或其他人为活动导致; 同时受土壤高盐度的影响, 作物生长受限, 影响了部分养分元素的迁移聚集, 这与前人研究结论相一致(马倩倩等, 2021; 刘寒双等, 2022)。

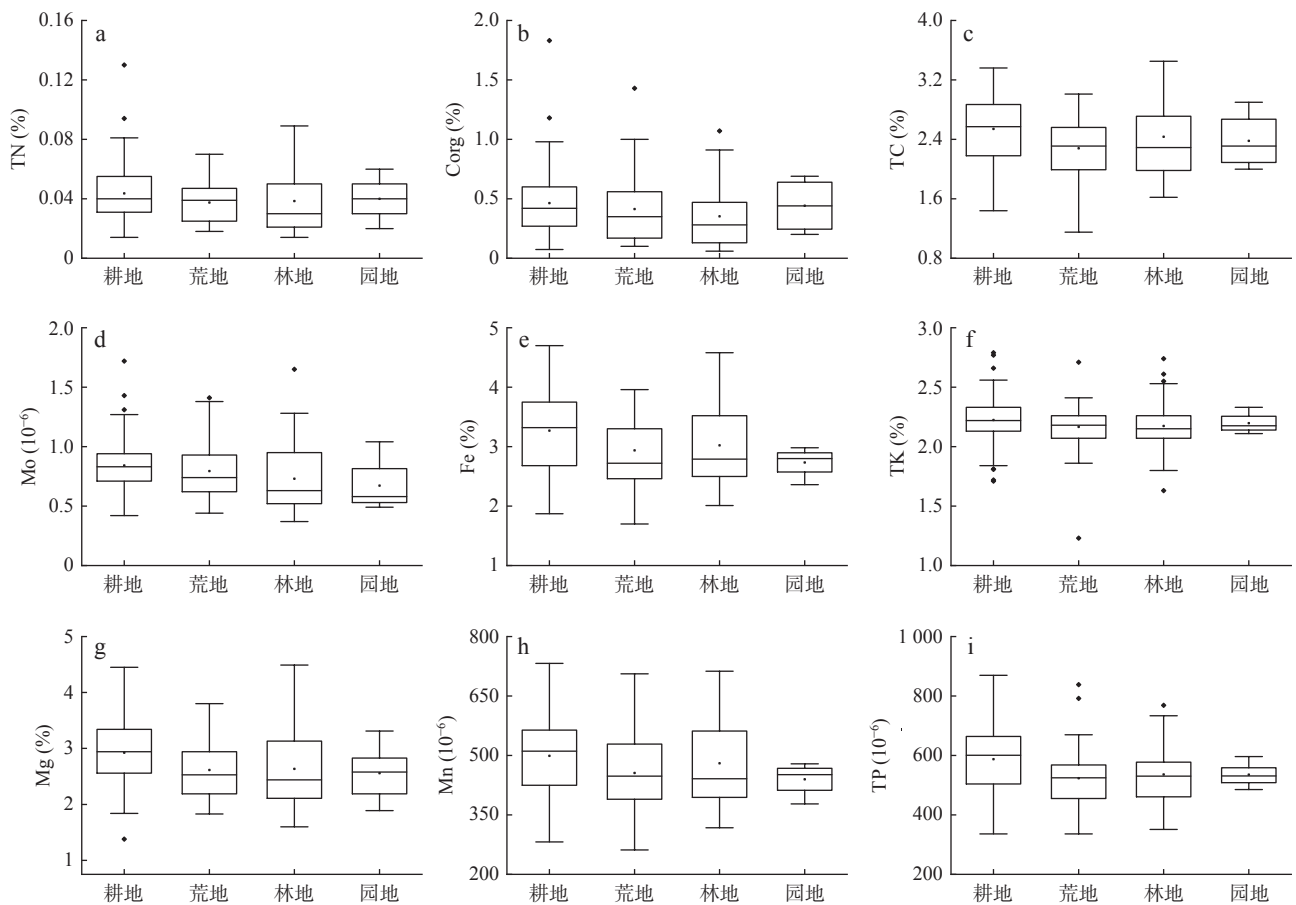


图4 不同土地利用类型的土壤养分元素分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of soil nutrient elements for different land-use types

#### 4.2 地形因子对土壤养分的影响

选取坡度、坡向、高程和地面粗糙度4个典型地形因子, 探讨其对于土壤养分含量的影响程度(魏新等, 2014), 地形数据通过地质云网站(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>)获取。利用SPSS 25.0和Canoco 5.0软件计算了各土壤养分元素与海拔(DEM)、坡度(SG)、坡向(SA)和地表粗糙度(SR)的Pearson相关系数和冗余系数。结果显示, 第I轴和第II轴中地形因子对土壤养分的解释量分别为63.12%和23.19%, 累计解释量达86.31%。对第I轴( $F=19.7$ ,  $P=0.003$ )和所有轴

( $F=22.3$ ,  $P=0.002$ )进行置换检验的P值均小于0.01, 说明结果可靠且良好。

前人研究发现, 高程、坡向与光照、温度、降水量、植被覆盖度等环境因素息息相关, 不同高程、坡向会对土壤以及植物产生重要影响(李丹维等, 2017); 地表粗糙度通过影响地表径流的流速、渗透、土壤侵蚀以及地表植被的分布来影响土壤中养分元素的分布(郭雯雯等, 2022)。坡度对于土壤中养分的影响和作用也是较大的, 不同坡度下土壤养分含量差异较大, 坡度越大则土层越薄, 水流侵蚀能力越强, 相应的土



壤厚度越小, 养分含量越少。研究区地形因子与养分元素的相关性排序为  $SR > SA > SG > DEM$ , 其中 DEM 与土壤中养分元素的含量存在显著的负相关关系(图 5、图 6), 原因是受重力作用和淋洗作用的影响(王宇超等, 2016), 土壤养分元素向低海拔处运移并最终聚集; SR、SA 与土壤中养分元素的聚集表现出一定的正相关性, 而 SG 与养分元素含量关系不显著, 这可能与研究区地形较为平坦有关。

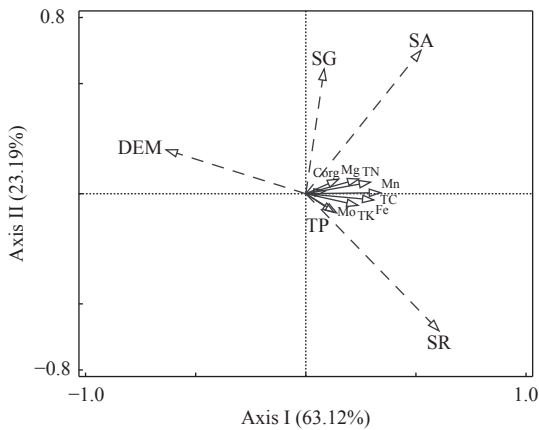


图 5 养分元素与地形因子冗余分析图

Fig. 5 Redundancy plot of nutrient factor and topographic factor analysis

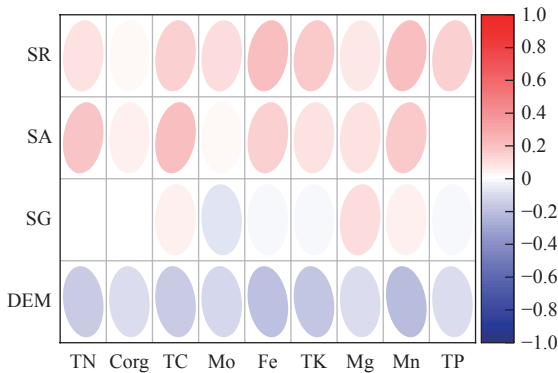


图 6 养分元素与地形因子相关性分析图

Fig. 6 The correlation analysis diagram between nutrient factors and topographic factors

#### 4.3 人为因素对土壤养分的影响

研究区土壤养分主要以 K 和 Mn 为主, 这与前人的研究一致(信会男等, 2022)。研究区属于棉花、香梨集中种植区, 形成了规模化的种植模式。近年来, 在国家节水灌溉政策的指引下区内也已全面实施滴灌手段, 为减轻咸水灌溉对于种植效果的影响, 在种植过程中往往需要在灌溉用水中加入土壤改良剂, 其中以黄腐酸钾最为常见, 改良剂的大量使用, 使得作

物中 K 离子浓度超过其吸收的最大值, 从而导致了 K 在土壤中的富集(陈彦, 2008)。综上所述, 土壤养分丰缺与长期连作、作物施肥、灌溉技术等人为影响有着密切的关系, 所以在农田施肥和土壤改良中, 应因地制宜、合理施肥, 保证土壤养分的协调供应。

#### 4.4 土地开发利用建议

(1) 加大投资力度, 针对养分质量差的土壤进行改良, 积极探索“以土治土”新模式(Ali et al., 2018), 推广测土配方技术方法, 选择合适形态的肥源, 培养有机肥提高土壤环境, 做到精准定量科学施肥, 合理种植固氮植物, 推动植物培肥养地工作, 促进土壤的可持续高效化利用。

(2) 分区分带精细化管理, 对土壤养分严重贫瘠区实施轮作休耕制度, 减轻开发利用强度、减少化肥农药投入, 改善土壤团粒结构(鲁泽让等, 2023), 促进土壤有机质含量自然恢复上升, 增强农业发展后劲, 实现“藏粮于地”。

(3) 针对区内生态环境和土壤特征差异, 坚持“宜农则农”、“宜林则林”、“宜牧则牧”的总体开发利用原则, 因地制宜发展工农业, 同时加强高标准农田建设, 推进后备耕地建设, 实现地区经济高质量发展。

### 5 结论

(1) 研究区土壤中 Fe、Mn 的含量高值分布面积最广, Mg 的含量高值区分布面积最小。东南方向为各养分元素聚集的主要区域, 这可能与东南部是研究区农业较为发达有关。对研究区土壤生态化学计量特征分析可知, 缺氮少磷是限制区内植物正常生长的主控因素。

(2) 从面积来看, 研究区贫瘠、极贫瘠土地面积占研究区总面积的 99.14%, 仅 0.86% 的土地处于中等水平; 从空间分布来看, 中等肥力的土地仅分布在区内东南部, 呈孤岛状散布, 未形成大面积的集中连片区, 土地养分的贫瘠一定程度上限制了区内规模化农业和精准农业的发展。

(3) 4 种土地利用方式中, 耕地的土壤养分值最高, 原因可能是耕地在种植棉花等作物过程中肥料大量使用及其他人为活动导致。地形因子的相关性排序为  $SR > SA > SG > DEM$ , 其中高程与土壤中养分元素的含量呈负相关关系, 地表粗糙度与养分元素含量呈

正相关关系。土壤养分丰缺与长期连作、作物施肥、灌溉技术等人为影响有着密切的关系。

致谢：匿名评审专家对稿件提出了宝贵的意见和建议，对此表示真诚的感谢！

## 参考文献(References):

- 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- BAO Shidan. Soil agrochemical analysis (3rd ed. ) [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2008.
- 陈金萍, 李奕, 李祥余, 等. 不同农业土地利用方式对土壤养分含量分布影响及养分等级评价[J]. 萍乡学院学报, 2022, 39(3): 111-116.
- CHEN Jinping, LI Yi, LI Xiangyu, et al. Effects of different agricultural land use practices on soil nutrient content distribution and evaluation of nutrient classes[J]. Journal of Pingxiang College, 2022, 39(3): 111-116.
- 陈彦. 绿洲农田土壤养分时空变异及精确分区管理研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2008.
- CHEN Yan. Research on spatial and temporal variability of soil nutrients in oasis farmland and precise zoning management[D]. Shihezi: Shihezi University, 2008.
- 冯博, 周皓, 徐阳, 等. 矿区农地重金属污染风险评价——基于改进的模糊综合评价法[J]. 有色金属工程, 2022, 12(2): 138-145.
- FENG Bo, ZHOU Hao, XU Yang, et al. Evaluation of heavy metal pollution risk in agricultural land in mining areas-based on improved fuzzy integrated evaluation method[J]. Nonferrous Metals, 2022, 12(2): 138-145.
- 郭雯雯, 毕淑琪, 李冰, 等. 不同土地利用参数下 CALPUFF 模型的敏感性分析[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(6): 705-709.
- GUO Wenwen, BI Shuqi, LI Bing, et al. Sensitivity analysis of CALPUFF model under different land use parameters[J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(6): 705-709.
- 贺思楠, 吕刚, 王锋柏, 等. 辽西北风沙地土壤养分空间变异性与土地利用的关系[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(2): 213-220.
- HE Sinan, LV Gang, WANG Fengbai, et al. Relationship between spatial variability of soil nutrients and land use in a wind-sand landscape in northwest Liaoning Province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2022, 53(2): 213-220.
- 黄彩变, 严军, 鞠景枫, 等. 塔里木盆地南缘新垦农田土壤性状变化及其与小麦产量的关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 245-252.
- HANG Caibian, YAN Jun, JU Jingfeng, et al. Changes in soil properties and their relationship with wheat yield in newly reclaimed farmland on the southern edge of the Tarim Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 245-252.
- 黄锦学, 熊德成, 刘小飞, 等. 增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 12-24.
- HUANG Jinxue, XIONG Decheng, LIU Xiaofei, et al. Effects of warming on soil organic carbon mineralization: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): 12-24.
- 贾佳瑜, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 汾河流域下游农田土壤重金属空间分布特征与污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8): 132-137.
- JIA Jiayu, LIU Xiaofang, ZHAO Yonggang, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in agricultural soils in the downstream of Fen River Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(8): 132-137.
- 贾鲁净, 杨联安, 封涌涛, 等. 宝鸡市农耕地土壤养分空间变异及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(12): 135-143.
- JIA Lujing, YANG Lianan, FENG Yongtao, et al. Spatial variability of soil nutrients and its influencing factors in the farming area of Baoji[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(12): 135-143.
- 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 160-170.
- LI Danwei, WANG Ziquan, TIAN Haixia, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents and ecological stoichiometry of soils at different altitudes in the Taibai Mountains[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 160-170.
- 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345-1355.
- LI Honglin, GONG Lu, ZHU Meiling, et al. Soil chemometric characteristics of oases on the northern edge of the Tarim Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1345-1355.
- 李美娟, 陈国宏, 陈衍泰. 综合评价中指标标准化方法研究[C]. 2004年中国管理科学学术会议, 2004.
- LI Meijuan, CHEN Guohong, CHEN Yantai. Research on standardization methods of indicators in comprehensive evaluation[C]. 2004 Chinese Management Science Conference, 2004.
- 廖启林, 华明, 张为, 等. 人为活动对江苏土壤元素含量分布的影响[J]. 地质学刊, 2012, 36(2): 147-156.
- LIAO Qilin, HUA Ming, ZHANG Wei, et al. Influence of anthropogenic activities on the distribution of soil elemental content in Jiangsu[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 36(2): 147-156.
- 刘寒双, 崔纪菡, 刘猛, 等. 有机肥替代部分化肥对谷子产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (7): 71-81.
- LIU Hanshuang, CUI Jihan, LIU Meng, et al. Effects of organic fer-

- fertilizers on grain yield, soil nutrients and enzyme activities by replacing some chemical fertilizers[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (7): 71–81.
- 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究[J]. *安全与环境学报*, 2007, (2): 109–113.
- LIU Qing, WANG Jing, SHI Yanxi, et al. Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils based on GIS[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, (2): 109–113.
- 鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 等. 周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响[J]. *环境科学*, 2023: 1–14.
- LU Zerang, XIA Zitai, LU Mei, et al. Effects of annual crop rotation fallow on the stability of soil AMF communities and aggregates[J]. *Environmental Science*, 2023: 1–14.
- 李青, 薛珍. 塔里木河流域居民生态认知与支付行为空间异质性研究——基于上中下游 2133 个居民调查数据[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 14–21.
- LI Qing, XUE Zhen. Spatial heterogeneity of ecological cognition and payment decision behavior in the Tarim River Basin: Based on the survey data of 2133 residents[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(1): 14–21.
- 马倩倩, 董博, 许旺旺, 等. 干旱区耕地质量等级评价及土壤养分与盐渍化的分析研究——以民勤绿洲为例[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(2): 514–524.
- MA Qianqian, DONG Bo, XU Wangwang, et al. Evaluation of arable land quality rating and analysis of soil nutrients and salinization in arid areas: the case of Minqin Oasis[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(2): 514–524.
- 能子礼超, 勾琴, 刘盛余, 等. 模糊数学法综合评价土壤重金属污染程度研究[J]. *能源与环保*, 2020, 42(7): 39–43.
- NENGZI Lichao, GOU Qin, LIU Shengyu, et al. Fuzzy mathematical method for comprehensive evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2020, 42(7): 39–43.
- 宋铮, 余庭龙, 朱春云, 等. 高寒丘陵区不同退耕年限人工林形质评价[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(6): 52–59.
- SONG Zheng, YU Tinglong, ZHU Chunyun, et al. Evaluation of the morphological quality of plantation forests in alpine hilly areas with different years of fallowing[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(6): 52–59.
- 陶睿, 王子芳, 高明, 等. 重庆市丰都县紫色土养分空间变异及土壤肥力评价[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 155–161.
- TAO Rui, WANG Zifang, GAO Ming, et al. Spatial variation of nutrients and evaluation of soil fertility in purple soils of Fengdu County, Chongqing[J]. *Soils*, 2017, 49(1): 155–161.
- 陶于祥, 许凯丰, 易宗旺, 等. 基于半变异函数的城市热岛空间异质性分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(10): 145–152.
- TAO Yuxiang, XU Kaifeng, YI Zongwang, et al. Spatial heterogeneity analysis of urban heat island based on semi-variance function[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2018, 40(10): 145–152.
- 田鸽. 秦岭火地塘土壤养分空间分布特征及其影响因素[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- TIAN Ge. Spatial distribution characteristics of soil nutrients in Tierra del Fuego in the Qinling Mountains and its influencing factors[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- 田立文, 祁永春, 戴路, 等. 新疆南疆耕地土壤养分含量及其分布特征评价——以阿克苏地区为例[J]. *核农学报*, 2020, 34(1): 214–223.
- TIAN Liwen, QI Yongchun, DAI Lu, et al. Evaluation of soil nutrient content and its distribution characteristics in arable land in South Xinjiang: an example from Aksu region[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2020, 34(1): 214–223.
- 王宇超, 李倩, 黎斌, 等. 秦岭南坡中段植物群落物种多样性与环境相关性分析[J]. *基因组学与应用生物学*, 2016, 35(10): 2859–2866.
- WANG Yuchao, LI Qian, LI Bin, et al. Analysis of species diversity and environmental relevance of plant communities on the southern slopes of the Qinling Mountains[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2016, 35(10): 2859–2866.
- 魏新, 郑小锋, 张硕新. 秦岭火地塘不同海拔梯度森林土壤理化性质研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(3): 9–14.
- WEI Xin, ZHENG Xiaofeng, ZHANG Shuoxin. Physicochemical properties of forest soils at different elevation gradients in Tierra del Fuego in the Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(3): 9–14.
- 信会男, 赖宁, 耿庆龙, 等. 基于 GIS 的塔额盆地农田土壤养分空间变异特征分析[J]. *新疆农业科学*, 2022, 59(07): 1776–1785.
- XIN Huinan, LAI Ning, GENG Qinglong, et al. Analysis of spatial variability of soil nutrients in agricultural fields of the Ta'er Basin based on GIS[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(07): 1776–1785.
- 闫金凤, 陈曦, 罗格平, 等. 干旱区绿洲地下水水位时空变异性对土地覆被变化的响应[J]. *科学通报*, 2006, (S1): 42–48.
- YAN Jinfeng, CHEN Xi, LUO Geping, et al. Response of spatial and temporal variability of groundwater levels to land cover change in an arid oasis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, (S1): 42–48.
- 杨阳, 李飒, 孙立强, 等. 半变异函数计算波动范围的方法研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(7): 618–626.
- YANG Yang, LI Sa, SUN Liqiang, et al. Research on the method of calculating the fluctuation range by semi-variance function[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(7): 618–626.
- 张慧文, 马剑英, 张自文, 等. 地统计学在土壤科学中的应用[J].

- 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 14–20.
- ZHANG Huiwen, MA Jianying, ZHANG Ziwen, et al. Application of geostatistics in soil science[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2009, 45(6): 14–20.
- 张子璐, 左昕弘, 刘峰, 等. 渝西丘陵区土壤速效钾空间异质性及影响因素[J]. *土壤学报*, 2020, 57(02): 307–315.
- ZHANG Zilu, ZUO Xinhong, LIU Feng, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of soil fast-acting potassium in the hilly areas of western Chongqing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(02): 307–315.
- 赵敬坤, 陈松柏, 李忠意, 等. 模糊综合评价法判断重庆花椒种植区土壤肥力水平[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(10): 206–212.
- ZHAO Jingkun, CHEN Songbai, LI Zhongyi, et al. Fuzzy integrated evaluation method to determine soil fertility level in pepper growing areas of Chongqing[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(10): 206–212.
- 朱平宗, 张光辉, 杨文利, 等. 红壤区林地浅沟不同植被类型土壤生态化学计量特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(06): 60–65.
- ZHU Pingzong, ZHANG Guanghui, YANG Wenli, et al. Soil ecological stoichiometry of different vegetation types in shallow furrows in red soil areas[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(06): 60–65.
- 赵雯, 黄来明. 高寒山区不同土地利用类型土壤养分化学计量特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(11): 4415–4427.
- ZHAO Wen, HUANG Laiming. Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in an alpine mountain region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11): 4415–4427.
- Ali E N, Sang S L, Yasser M A, et al. Influence of soil properties and feedstocks on biochar potential for carbon mineralization and improvement of infertile soils[J]. *Geoderma*, 2018, 332: 100–108.
- Ayoubi, Mehnatkesh, Jalalian, et al. Relationships between grain protein, Zn, Cu, Fe and Mn contents in wheat and soil and topographic attributes[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(5): 625–638.
- Cory C C, Daniel L. C: N: P Stoichiometry in Soil: Is There a "Red-field Ratio" for the Microbial Biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235–252.
- Cheng W J, Xi H Y, Sindikubwabo C, et al. Ecosystem health assessment of desert nature reserve with entropy weight and fuzzy mathematics methods: A case study of Badain Jaran Desert[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 119.
- Dai W, Li Y H, Fu W J, et al. Spatial variability of soil nutrients in forest areas: A case study from subtropical China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(6): 827–835.
- Khormali F, Ajami M, Ayoubi S, et al. Role of deforestation and hill-slope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province, Iran[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 134(3): 178–189.
- Li D X, Li Y N, Xie Y L, et al. Effects of ecological restoration on soil biogenic elements and their ecological stoichiometry in the Yellow River Delta, China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022.
- Li Q, Yang J Y, Guan W H, et al. Soil fertility evaluation and spatial distribution of grasslands in Qilian Mountains Nature Reserve of eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Peerj*, 2021, 9.
- Razan M, Shankar S, Dinesh K, et al. Soil Fertility Mapping and Assessment of the Spatial Distribution of Sarlahi District, Nepal[J]. *American Journal of Agricultural Science*, 2020, 7(1): 8–16.
- Sharma R, Sood K. Characterization of Spatial Variability of Soil Parameters in Apple Orchards of Himalayan Region Using Geostatistical Analysis[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51(8): 1065–1077.
- Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139–151.
- Xiao J J, Ma H X, Lu C T. Study on Spatial Distribution of Soil Nutrients and Comprehensive Evaluation of Nutrients in Low Mountain-Hilly Region of Sichuan Province, China[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 2301(295–298): 2544–2548.
- Zhang X X, Xu K, Zhang D J. Risk assessment of water resources utilization in Songliao Basin of Northeast China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(5): 1319–1329.