

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.042.

贺军奇, 拜寒伟, 王金泉, 等. 黄土区不同地貌类型耕地土壤养分空间格局及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 221-231.

He Junqi, Bai Hanwei, Wang Jinquan, et al. Spatial Patterns and Driving Factors of Soil Nutrient Contents in Cultivated Lands Across Various Topographical Types in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 221-231.

# 黄土区不同地貌类型耕地土壤养分空间格局及驱动因素

贺军奇<sup>1,2,3</sup>, 拜寒伟<sup>1,2,3</sup>, 王金泉<sup>1,2,3</sup>, 徐轶玮<sup>4</sup>, 倪莉莉<sup>5</sup>

(1. 长安大学 水利与环境学院, 西安 710054;

2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 水利部 旱区生态水文与水安全重点实验室, 西安 710054; 4. 陕西省科技交流中心, 西安 710054; 5. 陕西省耕地质量与环境保护工作站, 西安 710003)

**摘要:** [目的] 了解黄土区不同地貌条件耕地土壤养分空间格局, 揭示养分空间变化的驱动因素, 可为区域农业精准管理及农田工程建设提供参考。 [方法] 基于陕西黄土区 2020 年耕地土壤养分数据, 采用克里金插值揭示 4 种不同地貌耕地土壤养分空间格局, 采用地理探测器模型探讨养分空间变化的驱动因素作用。 [结果] (1) 长城沿线风沙滩区、陕北黄土丘陵沟壑区、渭北黄土台塬区和关中平原区有机质(SOM)含量均值分别为 10.20, 10.08, 15.28, 18.78 g/kg, 全氮(TN)均值分别为 0.63, 0.66, 0.98, 1.19 g/kg, 有效磷(AP)均值分别为 12.99, 13.10, 16.97, 27.24 mg/kg, 速效钾(AK)均值分别为 117.72, 149.94, 217.27, 252.83 mg/kg, 各养分空间格局总体呈现出“风沙滩—丘陵沟壑—台塬—平原”逐渐递增的趋势; (2) 日照时长对陕西黄土区整体养分含量解释力最大, 其次为年气温与化肥用量, 风沙滩区养分分布受土壤容重影响最大, 丘陵沟壑区、台塬区及平原区均受化肥用量影响最大, 排名前列的因子交互作用对养分的解释力均强于其单因子作用。 [结论] 风沙滩区及丘陵沟壑区宜适当增加养分输入及提升土壤保肥能力, 台塬区及平原区宜注重提高养分利用效率; 在农田建设过程中, 应根据不同地貌区环境特征因地制宜地进行人为活动。

**关键词:** 土壤养分; 驱动因素; 地理探测器; 地貌类型; 黄土区

中图分类号: S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0221-11

## Spatial Patterns and Driving Factors of Soil Nutrient Contents in Cultivated Lands Across Various Topographical Types in the Loess Plateau

He Junqi<sup>1,2,3</sup>, Bai Hanwei<sup>1,2,3</sup>, Wang Jinquan<sup>1,2,3</sup>, Xu Yiwei<sup>4</sup>, Ni Lili<sup>5</sup>

(1. School of Water and Environmental, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Ecological Hydrology and Water Security in Arid Areas, Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 4. Shaanxi Science and Technology Exchange Center, Xi'an 710054, China; 5. Shaanxi Province Farmland Quality and Agricultural Environmental Protection Workstation, Xi'an 710003, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to comprehend the spatial distribution patterns of arable soil nutrients in various geomorphic conditions of the Loess Plateau, to unveil the driving factors behind these changes, and to provide the critical insights for precision management in the regional agriculture and the construction of agricultural projects. [Methods] Based on the 2020 soil nutrient data from the Loess Plateau in Shaanxi, the Kriging interpolation method was employed to analyze the spatial patterns of soil nutrients across four different geomorphic types. The driving factors behind these nutrient spatial variations was explored by using the geodetector model. [Results] (1) In the Loess Plateau, spanning from the Great Wall's sandy lands, through the hilly and gully regions of northern Shaanxi, the loess table lands in northern of Weihe River, to

收稿日期: 2023-07-27

修回日期: 2023-11-13

资助项目: 中国工程院咨询研究项目“三结合基地建设在高级工程科技人才培养中的战略研究”(2019-JY-004); 陕西省哲学社会科学专项“榆林风沙滩区“治—修—富”三位一体可持续研究模式”(2022HZ1859)

第一作者: 贺军奇(1978—), 男, 陕西澄城人, 副教授, 博士, 主要从事旱区农田水利及生态水文研究。E-mail: hejunqi@chd.edu.cn

<http://stbcy.paperonce.org>

the Guanzhong Plain, the average contents of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) exhibited a gradual increasing trend. Specifically, the SOM content averaged 10.20, 10.08, 15.28, and 18.78 g/kg, respectively, across these regions. TN averaged 0.63, 0.66, 0.98, and 1.19 g/kg. AP level averaged 12.99, 13.10, 16.97, and 27.24 mg/kg, and AK averaged 117.72, 149.94, 217.27, and 252.83 mg/kg, respectively. This trend indicated a consistent increase from the sandy lands to the plains. (2) In the loess area of Shaanxi, the duration of sunshine had most significant factor influencing overall nutrient contents, followed by annual temperature and fertilizer use. The distribution of nutrients in the windy area was predominantly affected by soil bulk density, whereas in the hilly and gully areas, plateau areas, and plains, fertilizer use was the primary influencing factor. The interaction of various factors provided a more comprehensive explanatory of nutrient dynamics than individual factor alone. [Conclusion] To optimize soil health, it is advisable to increase nutrient input and enhance soil fertility retention in sandy areas and hilly and gully areas. In contrast, the focus should be on improving nutrient utilization efficiency for plateau and plain areas. Additionally, in the process of farmland, it is crucial to tailor human activities to suit the environmental characteristics and specific conditions of different geomorphic regions.

**Keywords:** soil nutrients; driving factors; geographic detector; geomorphic type; Loess Plateau

耕地土壤是农业生产的物质基础与粮食安全的重要保障<sup>[1-2]</sup>。而土壤养分直接影响着耕地粮食生产潜力及农业生态环境,是评价耕地质量的重要指标<sup>[3]</sup>。地貌类型作为制约耕地土壤养分含量最为重要的因素之一,在一定区域内控制着土壤、气候、地形等因素的地域分异性<sup>[4]</sup>。准确了解区域耕地土壤养分空间格局,探讨不同地貌驱动因素对土壤养分空间分异的影响,对区域精准施肥、耕地评价、农业管理、粮食产量提高与安全保障具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

随着国家对耕地资源的重视不断加强,耕地土壤养分的相关研究成为了当前热点。研究区地貌类型包括了平原<sup>[7]</sup>、旱塬<sup>[8]</sup>、黄土丘陵沟壑<sup>[9]</sup>、南方丘陵区<sup>[10]</sup>、三角洲等<sup>[11]</sup>,研究对象包含有机质<sup>[8]</sup>、氮<sup>[12]</sup>、磷<sup>[13]</sup>、钾<sup>[14]</sup>及各类微量元素<sup>[15]</sup>,研究内容包含了养分空间格局<sup>[16]</sup>、养分分布影响因素分析<sup>[17]</sup>、土壤养分评价等<sup>[18]</sup>。赵业婷等对渭河平原的兴平市耕地土壤 SOM 空间分布趋势进行了研究,发现部分区域 SOM 含量偏低<sup>[7]</sup>;夏利恒等探究了渭北旱塬白水縣耕地土壤 SOM, AP, AK 的养分空间变异影响因素作用,指出随着时间推移人为活动对养分影响增强<sup>[19]</sup>;郝丽婷等对黄土丘陵沟壑区碾庄沟流域坝地和梯田土壤养分演变状况进行了研究,发现研究区氮磷元素长期缺乏<sup>[9]</sup>。

但目前大多研究聚焦于小尺度、特定地貌,很少有大尺度下不同地貌条件养分特征及影响因素的对比研究,而这导致了大尺度区域农业发展与规划缺乏参考依据。在研究方法上,曹婧等通过 GIS 的空间插值法得到了陕西省农田土壤 AK 养分分布状况<sup>[14]</sup>;胡贵贵等通过地理探测器模型揭示了宝鸡市

耕地土壤养分空间分布的主导因素<sup>[20]</sup>。前人的研究表明, GIS 地统计模块的克里金插值可以很好地展示养分空间格局<sup>[3]</sup>;地理探测器模型相比于其他分析方法,无线性假设,在揭示单因子驱动作用的同时还可以揭示双因子对土壤养分的交互作用<sup>[5]</sup>。

陕西黄土区地形地貌多样,土壤形成环境、南北气候、人类活动差异大,是整体黄土区的典型代表,也是黄河流域重要的粮食产地,其当前正处于加快高质量发展、农业绿色转型的关键时期<sup>[21]</sup>。本研究以陕西黄土区为例,通过统计分析、普通克里金插值、地理探测器模型等方法在此复杂的环境下研究不同地貌条件土壤养分空间格局及其驱动因素作用,以期为黄土区农业生产与发展提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

陕西黄土区地处 106°18′—111°15′E, 33°42′—39°35′N, 位于黄土高原的中心部位,总面积约 13 万 km<sup>2</sup>,占全省面积的 63.2%,海拔 207~3 754 m。全区按地貌类型可分为长城沿线风沙滩区、陕北黄土丘陵沟壑区、渭北黄土台塬区和关中平原区(如图 1 所示)。长城沿线风沙滩区地处毛乌素沙地东南缘,属温带半干旱大陆性气候,年均雨量 300~400 mm,耕地土壤类型多为风沙土、黄绵土和新积土,区内土地平坦,水资源较丰富;陕北黄土丘陵沟壑区位于榆林南部至铜川北部,属暖温带半干旱季风气候,年均降雨量 350~650 mm,耕地土壤类型多为黄绵土与新积土,区内水资源分布不均,一般地层含水量少,且埋藏较深;渭北黄土台塬区位于北山以南,关中平原以北,为暖温带半湿润半

干旱气候,年降水量 550~730 mm,土壤类型多为褐土、黑垆土及黄绵土,由于地高水低,一般地层含水量少;关中平原位于渭北北山以南秦岭以北,属暖温带

半湿润气候,年均降雨量 550~750 mm,耕地主要土壤包括褐土、黄绵土及潮土等,区内耕地平坦,地下水补给条件好,水量丰富。

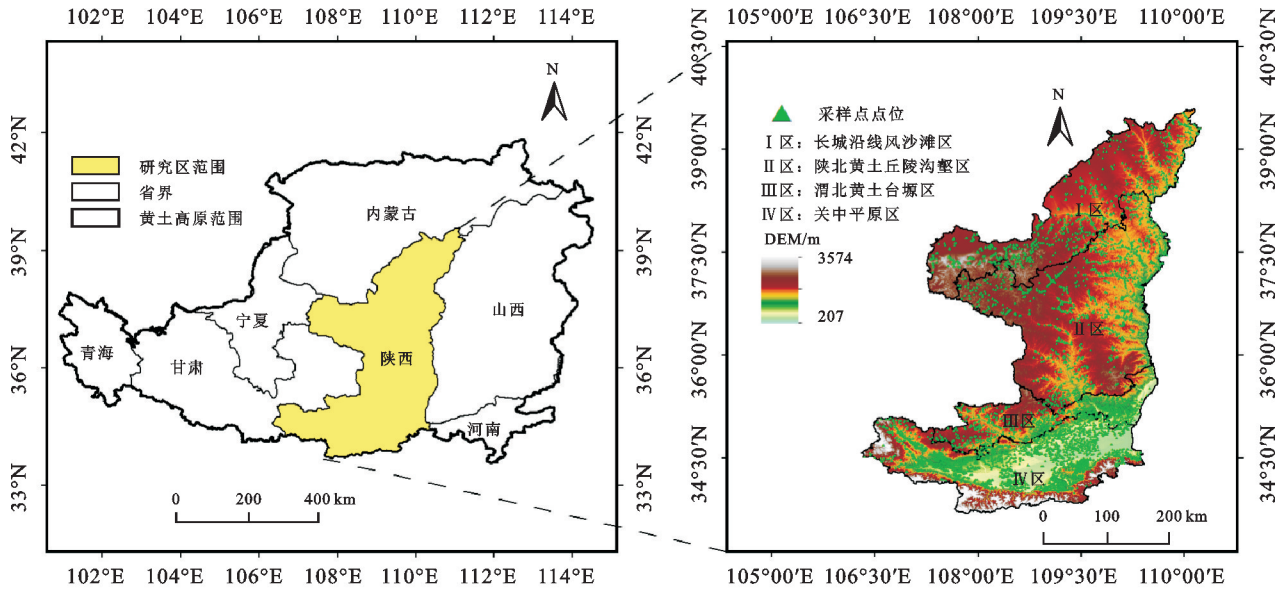


图 1 研究区位置及采样点分布  
Fig. 1 Distribution map of study sites and sampling sites

1.2 数据来源及数据处理

1.2.1 土样采集与测定 本研究土壤样品于 2020 年 9—11 月采集,将土地利用现状图、土壤图、行政区划图叠加作为底图,根据全面性、均匀性、代表性原则布设采样点,采集 0—20 cm 表层土壤,记录经纬度坐标、高程等信息。同时,根据底图、现场勘察和调查访问记录土壤类型、灌溉方式、作物类型等信息。本次共采集土壤样品 5 096 份,通过油浴加热重铬酸钾容量法测定样品 SOM 含量,通过半微量开氏法测定 TN 含量,通过碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定 AP 含量,通过乙酸铵浸提—火焰光度法测定 AK 含量。

1.2.2 影响因子选择与获取 根据陕西省农业农村

厅官网(<http://nynct.shaanxi.gov.cn/>)发布的关于农田建设的相关信息,确定研究区 4 类地貌类型及其范围。综合前人研究成果及研究区实际情况,充分考虑土壤属性、气候条件、地形条件、人为活动 4 类影响因素,共选择 16 个影响因子(如表 1 所示)。其中,日照、降雨、气温和蒸发数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)2020 年气象数据集;坡度、坡向、地形起伏度通过空间地理数据云(<http://www.Gscloud.cn/>)的 30 m ASTER GDEM 数据在 ArcGIS 中提取;研究区 2020 年化肥用量数据来源于各市区统计年鉴;土壤属性及其他人为活动数据来源于土样测定与野外调查。

表 1 土壤养分影响因子

Table 1 Table of soil nutrient impact factors

类型	变量	影响因子	单位	类型	变量	影响因子	单位
土壤属性	pH	$X_1$		地形因素	$X_9$	高程	m
	表层土壤容重	$X_2$	$\text{g}/\text{cm}^3$		$X_{10}$	坡度	( $^\circ$ )
	土壤类型	$X_3$			$X_{11}$	坡向	( $^\circ$ )
	成土母质	$X_4$			$X_{12}$	地表起伏度	m
气候因素	年日照时长	$X_5$	h	人为活动	$X_{13}$	化肥用量	$\text{kg}/\text{hm}^2$
	年降雨量	$X_6$	mm		$X_{14}$	灌溉方式	
	年气温	$X_7$	$^\circ\text{C}$		$X_{15}$	作物类型	
	年蒸发量	$X_8$	mm		$X_{16}$	熟制	

1.2.3 数据处理 通过三倍标准差法及临近点对比法剔除土壤养分异常值,在 SPSS 27.0 中进行土壤养分统计性描述,在 ArcGIS 10.7 中通过普通克里金插值法完成养分空间插值,通过 Rstudio 构建地理探测

器模型研究区域整体及不同地貌分区土壤养分含量驱动因素作用。

1.3 研究方法

1.3.1 经典统计学 基于 SPSS 统计分析,以最大



值、最小值、平均值、标准差和变异系数等参数描述陕西黄土区不同地貌土壤养分总体特征。其中,变异系数  $C_v$  用来描述养分含量变化的剧烈程度。 $C_v \leq 10\%$  时,为弱变异; $10\% < C_v \leq 100\%$  时,为中等变异强度; $C_v > 100\%$  时,为强变异<sup>[22]</sup>。

1.3.2 克里金插值 基于 GIS 的克里金插值可根据采样点养分数对邻近区域进行养分值的无偏最优估计,从而得到研究区各养分空间分布状况<sup>[23]</sup>。本研究采用普通克里金法进行土壤养分空间格局分析,其公式为:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (1)$$

式中: $Z(X_0)$  为  $X_0$  处的养分预测值; $\lambda_i$  为权重指数; $Z(X_i)$  为  $X_i$  处养分的实测值, $n$  为参与插值的样点数。

1.3.3 地理探测器 本研究采取地理探测器中的因子探测器计算 16 种驱动因素对 SOM, TN, AP, AK 空间变化的解释力,用  $q$  值度量,采用交互作用探测器探究两因素共同作用对各养分空间变化的解释力。通过 Rstudio 软件构件模型对数据进行处理,对于连续变量,程序自动选择不同离散方式与间断点数组组合时的  $q$  最高值,从而得到驱动因素对养分分异的解释

力<sup>[24]</sup>。定性因素根据类型进行分类,土壤类型分为黄绵土、褐土、风沙土、新积土、潮土、黑垆土、红黏土和水稻土;成土母质分为黄土母质、风沙母质、冲积母质、残积母质、湖积母质、坡积母质和红土母质;灌溉方式分为无灌溉、漫灌、滴灌、畦灌、沟灌和喷灌。作物类型分为谷类、果蔬、薯类、药用、豆类、油料作物和其他;作物熟制分为一年一熟、一年两熟、一年三熟、两年三熟和多年生。因子探测器的计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: $q$  表示驱动因子  $X$  对养分含量  $Y$  的解释力; $h$  表示驱动因子分层数或分类数 ( $h = 1, 2, \dots, L$ );  $\sigma_h^2$  与  $\sigma^2$  为因子在  $h$  层和整体范围时的养分含量方差; $N_h$  和  $N$  为  $h$  层和整体范围时的因子数量, $q$  的值域为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越大,说明驱动因子对土壤养分分异的解释力越强,反之越弱<sup>[25]</sup>。

交互探测器用以评价驱动因子  $X_1$  与  $X_2$  共同作用对养分含量的解释程度,通过与两因子单独作用的  $q$  值对比,将交互作用分为 5 类,如表 2 所示。

表 2 双因子交互作用类型

Table 2 Type of two-factor interactions

判断依据	交互作用类型
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强
$q(X_1) + q(X_2) > q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	相互独立
$\max[q(X_1), q(X_2)] > q(X_1 \cap X_2) > \min[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱

## 2 结果与分析

### 2.1 不同地貌分区土壤养分统计特征

基于 SPSS 的统计分析结果如表 3 所示。SOM 含量均值表现为关中平原区 > 渭北黄土台塬区 > 长城沿线风沙滩区 > 陕北黄土丘陵沟壑区,其大小依次为 18.75, 15.28, 10.20, 10.08 g/kg。TN, AP, AK 含量均值均表现为关中平原区 > 渭北黄土台塬区 > 陕北黄土丘陵沟壑区 > 长城沿线风沙滩区。各分区 4 类养分最大值与最小值相差较大且变异系数基本介于 0.1~1,属于中等程度变异,表明不同地貌条件下养分均存在不同程度空间差异。AP 与 AK 变异系数明显高于 SOM 和 TN,表明前者受人为活动影响更大。黄土台塬区与关中平原区各养分变异系数显著低于风沙滩区与黄土丘陵沟壑区,表明前者养分含量变化更稳定。总体来看,不同地貌条件养分含量存在较大差异,平原区各养分含量最高,其次为台塬区和丘陵沟壑区,风沙滩区养分含量最低。

### 2.2 不同地貌土壤养分空间格局

通过 GIS 进行地统计学分析并采用普通克里金法进行插值,根据《国家耕地质量长期定位监测评价报告》中关于黄土高原区耕地质量主要指标分级标准(表 4)进行养分分类,得到不同地貌养分空间分布格局。整体上,研究区不同地貌条件养分分布差异显著,4 种养分总体呈现“平原—台塬—丘陵沟壑—风沙滩”不断减少的趋势。

长城沿线风沙滩区养分空间分布如图 2 所示。区域 SOM 含量多介于 5.0~15.0 g/kg,属于 3 级、4 级标准,含量中等的区域较多,含量低的区域相对较少;TN 含量低,多小于 0.75 g/kg,属于 5 级标准;AP 含量总体介于 5.0~15.0 mg/kg,含量较低的区域面积相对更多,榆阳部分地区为 3 级标准,AP 含量相对其他区县更高;AK 大多小于 150 mg/kg,多为 4 级、5 级水平,定边县南部区域为 3 级标准,相对其他地区较多。全区宜采取措施提升氮、钾含量并减少两种养分流失量。

表 3 不同地貌分区土壤养分描述性统计分析

Table 3 Descriptive statistical analysis of soil nutrients in different geomorphological zones

养分指标	地貌分区	最小值	最大值	平均数	标准差	变异系数
SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )	长城沿线风沙滩区	1.26	37.18	10.20	4.56	0.45
	陕北黄土丘陵沟壑区	1.33	29.13	10.08	4.44	0.44
	渭北黄土台塬区	4.88	34.29	15.28	4.02	0.26
	关中平原区	4.65	37.97	18.78	5.18	0.28
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	长城沿线风沙滩区	0.06	2.19	0.63	0.30	0.48
	陕北黄土丘陵沟壑区	0.04	2.26	0.66	0.29	0.43
	渭北黄土台塬区	0.27	2.10	0.98	0.24	0.25
	关中平原区	0.22	2.23	1.19	0.32	0.27
AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	长城沿线风沙滩区	0.04	106.43	12.99	13.55	1.04
	陕北黄土丘陵沟壑区	0.36	99.49	13.10	14.65	1.12
	渭北黄土台塬区	0.46	100.63	16.97	13.22	0.78
	关中平原区	2.33	106.20	27.24	18.46	0.68
AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	长城沿线风沙滩区	18.00	579.00	117.72	63.80	0.54
	陕北黄土丘陵沟壑区	30.00	665.58	149.94	94.62	0.63
	渭北黄土台塬区	65.00	613.79	217.27	103.63	0.48
	关中平原区	48.00	694.78	252.83	123.98	0.49

表 4 黄土高原区耕地质量监测主要指标分级标准

Table 4 Classification standard of the main indicators of cultivated land quality monitoring in Loess Plateau Area

指标	分级标准				
	1 级(高)	2 级(较高)	3 级(中)	4 级(较低)	5 级(低)
SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )	>20.0	15.0~20.0	10.0~15.0	10.0~15.0	≤5.0
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	>1.50	1.25~1.50	1.00~1.25	0.75~1.00	≤0.75
AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	>35.0	25.0~35.0	15.0~25.0	5.0~15.0	≤5.0
AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	>250	200~250	150~200	100~150	≤100

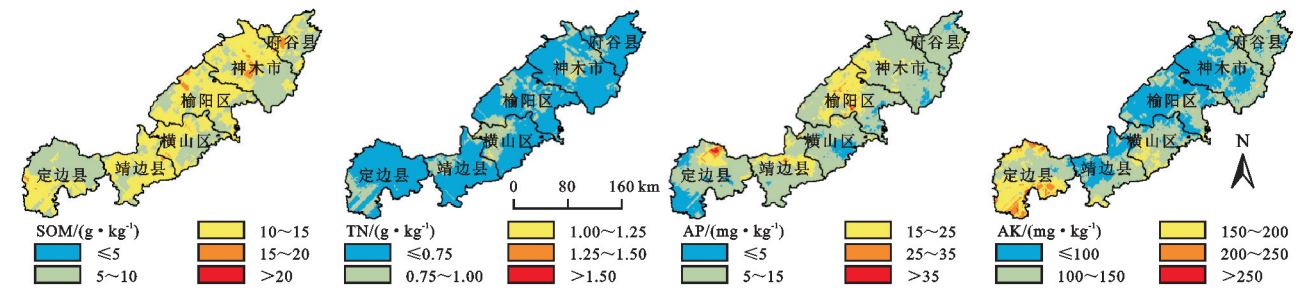


图 2 长城沿线风沙滩区耕地土壤养分分布

Fig. 2 Soil nutrient distribution map of cultivated land in the Windy Beach Area along the Great Wall

陕北黄土丘陵沟壑区养分空间分布如图 3 所示,区域 SOM 含量多介于 5.0~20.0 g/kg,由北向南养分等级依次为 4 级、3 级、2 级;TN 含量多为 1.25 g/kg 以下,由北向南养分等级依次为 5 级、4 级、3 级含量。富县、宜川以北两种养分相对缺乏,养分提升空间更大,区域南部的宜君、黄龙两种养分含量相对其他区域更高。AP 含量多介于 5.0~25.0 mg/kg,4 级标准面积更大。AK 含量空间差异显著,5 级分布于西侧甘泉、富县、志丹一带,1~3 级多分布于南侧宜君、洛

川、黄龙、宜川一带,其余地方多为 4 级标准。

渭北黄土台塬区养分空间分布如图 4 所示。SOM 含量多处于 10.0~20.0 g/kg 以上,属于 2 级、3 级标准,耀州南部、麟游北部、澄城、合阳西部的 SOM 含量为 3 级标准,相比于其他地区有待提升。TN 含量多处于 0.75~1.25 g/kg,3、4 级标准区交错分布。AP 和 AK 呈现为两边高、中间低的现象,低值多分布于麟游、耀州、印台、王益等地区。

关中平原区养分等级分布与渭北黄土台塬区养分

等级相似,但各养分含量值更高,区域 SOM,AK 含量整体分布均匀且含量丰富,应继续采取措施保持,大荔县、

乾县、礼泉的 TN 含量和陈仓、岐山、凤翔、陇县、千阳、金台、渭滨的 AP 含量相对较低,有更高提升空间(图 5)。

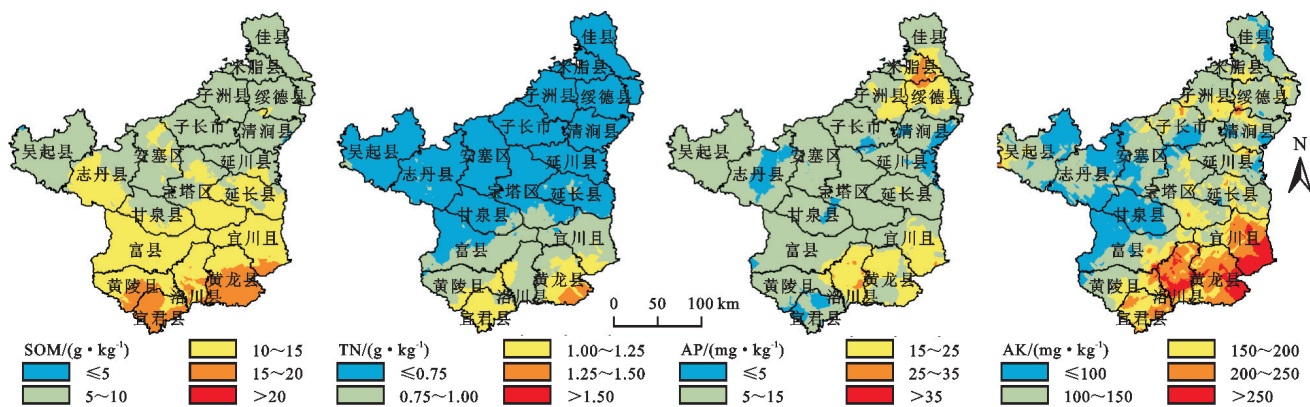


图 3 陕北黄土丘陵沟壑区耕地土壤养分分布

Fig. 3 Soil nutrient distribution map of cultivated land in loess hilly and gully regions of northern Shaanxi

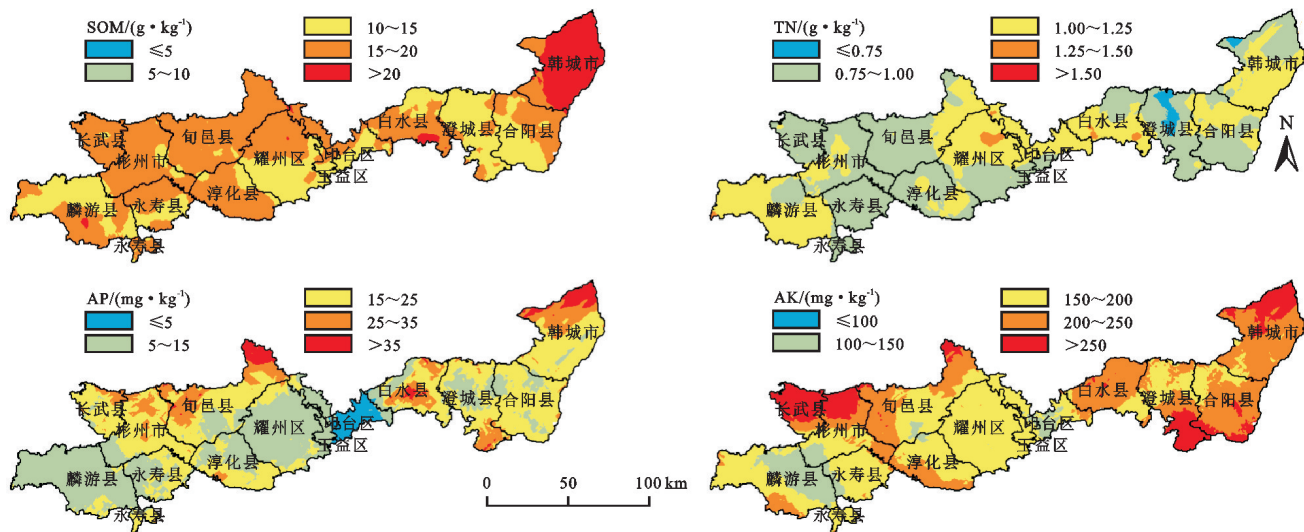


图 4 渭北黄土台塬土壤养分分布

Fig. 4 Distribution of soil nutrients in cultivated land of the north of Weihe River in the Loess Plateau

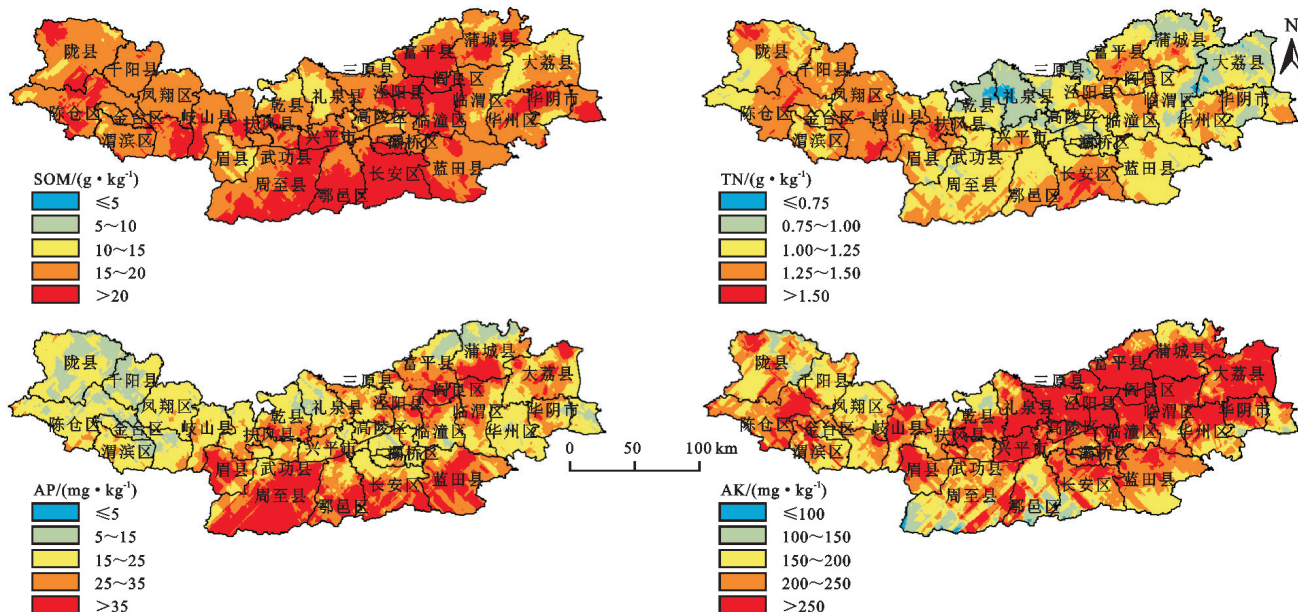


图 5 关中平原耕地土壤养分分布

Fig. 5 Distribution of soil nutrients in cultivated land of Guanzhong Plain



2.3 不同地貌土壤养分驱动单因素作用

因子探测分析结果(图 6)表明,各驱动因素在不同地貌分区对养分含量的影响差异较大,同一地貌区域内各驱动因素的影响力  $q$  值也存在明显差异。陕西黄土区整体范围各驱动因素  $q$  值均处于 0.50 以下, SOM 含量受年日照时长影响最大( $q$  值为 0.43), 其次为化肥用量、年气温( $q$  值分别为 0.37, 0.35), 降雨、气温、高程、土壤类型等因素  $q$  值位于 0.2~0.3, 其他因素驱动作用均低于 0.2, 对 SOM 含量影响较小。各驱动因素对 TN 的作用与 SOM 类似, 两者  $q$  值相差较小。AP 受各因素作用的程度更小, 影响力  $q$  值均小于 0.2, 其中最强的驱动因子为气温和高程(均为 0.16)。AK 受温度、日照时长、高程、化肥用量的影响较大,  $q$  值位于 0.2~0.25, 其他因素驱动作用均低于 0.2。以 4 种养分  $q$  的均值衡量驱动因素对土壤养分的影响, 则研究区整体受年日照时长影响最大,  $q$  均值为 0.31; 其次为年气温、化肥用量、高程、作物熟制、土壤类型,  $q$  均值分别为 0.27, 0.27, 0.23, 0.20, 0.17。

从地貌类型来看, 长城沿线风沙滩区各驱动因素的作用相对其他区域明显较小, 驱动因素  $q$  值均不大于 0.15。表层土壤容重对 SOM, TN, AP 含量的影响最大,  $q$  值分别为 0.15, 0.13, 0.14; 化肥用量对 AK 含量影响最大,  $q$  值为 0.07, 土壤容重次之(0.06)。整体上, 表层土壤容重对土壤养分影响力最强, 养分  $q$  均值为 0.12, 其次为 pH 与灌溉方式,  $q$  均值均为 0.06。AP 相对于其他养分在该区域内对各驱动因素更敏感。陕北黄土丘陵沟壑区各驱动因素  $q$  值位于 0.40 以下, 化肥用量对 SOM, AP, AK 含量的作用最大, 影响力分别为 0.27, 0.17, 0.22, 年日照时长对 TN 含量的影响最大(0.36)。总体上, 化肥用量对土壤养分影响力最强,  $q$  均值为 0.24, 其次为年日照时长(0.18)与年蒸发量(0.15)。SOM 和 TN 受各驱动因素影响的程度高于 AP 和 AK。渭北黄土台塬区除化肥使用量对 AP 的影响力达到 0.28 外, 其余因素对养分的  $q$  值均小于 0.15。对 SOM, TN, AP, AK 含量的影响力最强的因素均为化肥用量,  $q$  值分别为 0.12, 0.14, 0.28, 0.11。区域内化肥使用量对养分含量的影响显著高于其他因素, 其次为土壤容重和年蒸发, 三者  $q$  均值分别为 0.17, 0.07, 0.06。关中平原区各驱动因素  $q$  值均低于 0.2。化肥用量对 SOM, TN, AP 含量的影响力均表现为最大, 分别为 0.16, 0.17, 0.07, 年气温对 AK 的影响最大(0.11)。总体上, 平原区对土壤养分影响前三的因素为化肥用量、土壤 pH、作物类型, 三者  $q$  均值分别为 0.13, 0.07, 0.07。SOM 与 TN 受土壤属性与人为活动影响更大, AK 含量受气候因素作用相比于其他养分更明显。

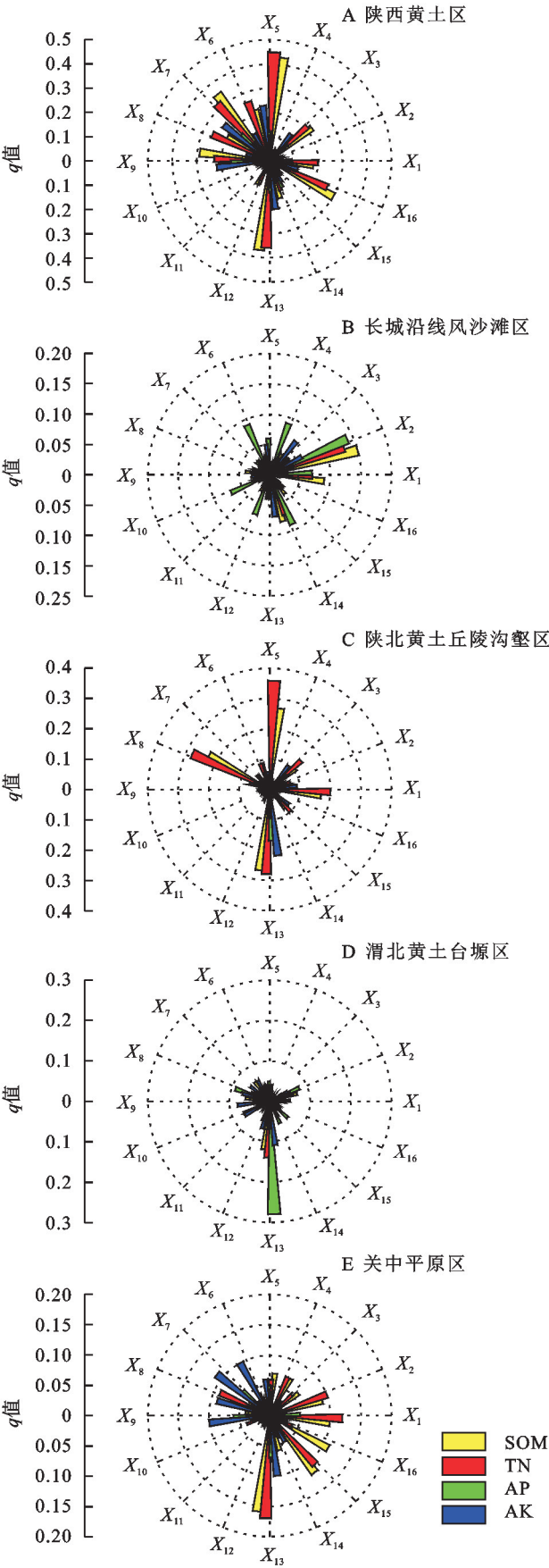


图 6 陕西黄土区不同地貌类型驱动因子的  $q$  值

Fig. 6  $q$ -values of drivers of different landform types in Loess Plateau of Shaanxi

## 2.4 不同地貌土壤养分驱动因素交互作用

交互作用可判断两驱动因素共同作用时对养分含量的解释力相对于两因素单独作用时的解释力是增强还是减弱。列出陕西黄土区整体及各地貌分区各养分影响力前 3 的交互作用类型如表 5 所示,结果表明所列因子交互作用的解释力均强于单因子作用。陕西黄土区整体范围因子交互作用对 SOM 与 TN

含量分布的解释更强,前 3 的解释强度均为 0.5 左右;对 AP 和 AK 的因子交互作用解释强度稍弱, $q$  处于 0.2~0.3。已列出的两因子交互作用均表现为双因子增强。对 SOM 和 TN 解释最强的交互作用类型均为 pH 与日照时长,解释力分别为 0.499,0.526,对 AP,AK 解释最强的交互作用类型分别为 pH 与高程(0.227)、年气温与化肥用量(0.298)。

表 5 不同地貌土地壤养分驱动因素交互作用

Table 5 Interaction of nutrient driving factors in cultivated soil of different landforms

地貌 分区	SOM			TN			AP			AK		
	交互作用	$q$	交互关系	交互作用	$q$	交互关系	交互作用	$q$	交互关系	交互作用	$q$	交互关系
陕西黄土区	$X_1 \cap X_5$	0.499	$b$	$X_1 \cap X_5$	0.526	$b$	$X_1 \cap X_9$	0.227	$b$	$X_7 \cap X_{13}$	0.298	$b$
	$X_5 \cap X_{16}$	0.487	$b$	$X_5 \cap X_{13}$	0.507	$b$	$X_1 \cap X_7$	0.225	$b$	$X_5 \cap X_9$	0.296	$b$
	$X_3 \cap X_5$	0.482	$b$	$X_2 \cap X_5$	0.500	$b$	$X_7 \cap X_{13}$	0.223	$b$	$X_9 \cap X_{13}$	0.293	$b$
长城沿线风沙滩区	$X_1 \cap X_{13}$	0.196	$a$	$X_1 \cap X_{14}$	0.170	$a$	$X_7 \cap X_{14}$	0.214	$a$	$X_4 \cap X_5$	0.124	$a$
	$X_1 \cap X_{14}$	0.189	$a$	$X_1 \cap X_{13}$	0.168	$a$	$X_1 \cap X_6$	0.213	$a$	$X_5 \cap X_{11}$	0.123	$a$
	$X_1 \cap X_7$	0.187	$a$	$X_1 \cap X_7$	0.161	$a$	$X_5 \cap X_6$	0.196	$a$	$X_{12} \cap X_{13}$	0.122	$a$
陕北黄土丘陵沟壑区	$X_6 \cap X_{13}$	0.406	$a$	$X_5 \cap X_{13}$	0.484	$b$	$X_2 \cap X_5$	0.158	$a$	$X_1 \cap X_9$	0.175	$a$
	$X_8 \cap X_{13}$	0.392	$b$	$X_8 \cap X_{13}$	0.474	$b$	$X_2 \cap X_{13}$	0.157	$b$	$X_1 \cap X_{15}$	0.170	$b$
	$X_5 \cap X_{13}$	0.392	$b$	$X_5 \cap X_6$	0.442	$b$	$X_5 \cap X_{13}$	0.153	$b$	$X_1 \cap X_8$	0.169	$a$
渭北黄土台塬区	$X_2 \cap X_7$	0.253	$a$	$X_5 \cap X_{13}$	0.168	$b$	$X_1 \cap X_8$	0.250	$a$	$X_2 \cap X_{12}$	0.163	$a$
	$X_2 \cap X_9$	0.230	$a$	$X_2 \cap X_{13}$	0.166	$b$	$X_1 \cap X_{12}$	0.204	$a$	$X_6 \cap X_{12}$	0.161	$a$
	$X_5 \cap X_7$	0.227	$a$	$X_2 \cap X_{12}$	0.163	$a$	$X_1 \cap X_5$	0.184	$a$	$X_2 \cap X_9$	0.160	$a$
关中平原区	$X_1 \cap X_{15}$	0.215	$b$	$X_1 \cap X_5$	0.238	$a$	$X_1 \cap X_5$	0.147	$a$	$X_7 \cap X_8$	0.157	$b$
	$X_1 \cap X_5$	0.215	$a$	$X_1 \cap X_8$	0.236	$a$	$X_1 \cap X_8$	0.141	$a$	$X_8 \cap X_9$	0.154	$b$
	$X_2 \cap X_{13}$	0.213	$b$	$X_1 \cap X_{15}$	0.229	$b$	$X_1 \cap X_9$	0.138	$a$	$X_2 \cap X_7$	0.150	$a$

注: $a$  表示非线性增强, $b$  表示双因子增强。

长城沿线风沙滩区前 3 的解释强度处于 0.12~0.22,总体表现为 AP>SOM>TN>AK,单因素作用最强的表层容重在交互作用方面并没有与其他因素组合而产生较高的解释力,两因子交互作用均表现为单因子非线性增强。对 SOM,TN,AP,AK 解释最强的交互作用类型分别为 pH 与化肥用量(0.196)、pH 与灌溉方式(0.170)、年气温与灌溉方式(0.214)、成土母质与日照时长(0.124)。陕北黄土丘陵沟壑区前 3 的交互作用解释强度处于 0.15~0.49,其对 SOM 和 TN 的解释强度显著高于对 AP 和 AK 的解释强度,两因子交互作用表现为非线性增强与双因子增强。对 SOM,TN,AP,AK 解释最强的交互作用类型分别为年降雨量与化肥用量(0.406)、年日照时长与化肥用量(0.484)、表层容重与年日照时长(0.158)、pH 与高程(0.175)。渭北黄土台塬区前 3 的交互作用解释强度处于 0.16~0.26,驱动因素交互作用对 SOM 和 AP 的解释强度显著高于对 TN 和 AK 的解释强度。对 SOM,TN,AP,AK 解释最强的交

互作用类型分别为表层容重与年气温(0.253)、年日照时长与化肥用量(0.168)、pH 与年蒸发量(0.250)、表层容重与地表起伏度(0.163)。关中平原区前 3 的交互作用解释强度处于 0.13~0.24,各驱动因素交互作用对 SOM 和 TN 的解释强度显著高于对 AP 和 AK 的解释强度。对 SOM,TN,AP,AK 解释最强的交互作用类型分别为 pH 与作物类型(0.215)、pH 与年日照时长(0.238)、pH 与年日照时长(0.147)、年气温与年蒸发(0.157)。

## 3 讨论

本文采用统计学与克里金插值方法揭示了陕西黄土区不同地貌养分空间格局,结果表明各养分含量总体呈现由北向南逐渐递增的趋势。关中平原因自身优越的环境条件,养分含量丰富,陕北的风沙滩区与黄土丘陵沟壑区由于本身土壤贫瘠,且各类环境因素限制了 SOM,TN 等养分的积累,因而养分含量缺乏,这与赵业婷等的研究结果一致<sup>[7-9]</sup>。对比前人关于研究区



2017年耕地土壤养分的研究,各地貌分区2020年土壤养分含量明显增高,这主要是由于近年来国家对耕地的保护政策加强与高标准农田工程的实施<sup>[26]</sup>。

地理探测器模型揭示了养分空间差异背后的驱动因素作用。气象因子均具有较强解释力,说明了气候条件对大尺度上土壤养分空间格局分布起决定作用,这与王琦等人的研究结果一致<sup>[12]</sup>。pH可通过影响微生物的数量与其对腐殖质的分解速率进而影响不同养分的分解与转化过程,已有研究表明pH与各土壤养分因子具有显著相关性<sup>[27-28]</sup>。研究区土壤类型多样,主要包含了黄绵土、褐土、潮土、黑垆土和风沙土等,风沙滩区主要以风沙土、黄绵土为主,风沙土易受风力搬运作用,SOM与腐殖质难以积累,区域养分整体偏低;丘陵沟壑区主要为黄绵土,土质疏松,各类养分离子易流失;台塬区除黄绵土外,部分地区也存在有黑垆土与褐土,保水保肥更强;关中平原区以褐土、黄绵土、潮土为主要土壤,养分含量最为充足<sup>[29]</sup>。研究区整体范围的高程差较大,高海拔地区主要为养分流失严重、土壤贫瘠的陕北区域,低海拔主要为肥沃的关中地区,因而两者呈现出较高的相关性<sup>[30]</sup>。化肥用量是耕地土壤养分最直接的来源之一,无论是整体区域还是地貌分区,其都具有较高的解释力<sup>[17]</sup>。作物熟制是依据于土壤状况、气候条件的人为活动,因此也具有较高相关性。各地貌分区的驱动因素解释力小于黄土区整体的解释力,这主要是由于不同地貌类型的地形与气候差异较大,导致了水热条件和侵蚀过程也有所不同,进而影响土壤属性、植被生长及人为活动,并最终导致各类养分的空间差异,但同一地貌区域内各类环境条件相似,差异减小,因而降低了各类因素对土壤养分的影响<sup>[12]</sup>。

从空间格局分析来看,建议长城沿线风沙滩区与黄土丘陵沟壑区关注氮、钾含量,通过秸秆还田、适当增加化肥用量以提高养分含量;渭北黄土台塬与关中地区宜在通过增加农业基础设施进一步提高土壤养分含量的同时进行精耕细作,大力发展智慧农业以提高产量与养分利用效率。根据影响因素分析结果,建议在研究区高标准农田建设中,可多关注基础水利设施建设、土壤酸碱调节等项目。本研究探讨了黄土区不同地貌土壤耕地土壤养分空间格局及驱动因素作用,下一步研究可聚焦于土壤养分与耕地质量评价,为区域农业发展提供更深层的指导。

## 4 结论

(1) 不同地貌条件养分含量存在显著差异,各养

分空间格局总体呈现出“平原—台塬—丘陵沟壑—风沙滩”逐渐减少的趋势。

(2) 日照时长对陕西黄土区整体养分含量解释力最大,4种养分 $q$ 均值为0.31,其次为年气温与化肥用量,风沙滩区养分分布受土壤容重影响最大, $q$ 均值为0.12,丘陵沟壑区、台塬区及平原区均受化肥用量影响最大, $q$ 均值分别为0.17,0.07,0.06,排名前列的因子交互作用对养分的解释力均强于其单因子作用。

(3) 风沙滩区及丘陵沟壑区宜通过秸秆还田、适当增加肥料等措施来提高养分含量,台塬区及平原区宜采取措施提高产量与养分利用效率。在农田建设过程中,应注意影响作物产量的多方因素,并根据不同地貌区土壤、地形、气候等环境因素因地制宜地进行人为活动。

## 参考文献(References):

- [1] 邓晓倩,马素娟,曹晓萍,等.青海省互助县10年耕地土壤养分状况、变化趋势及肥力评价[J].水土保持研究,2022,29(6):112-120.  
Deng X Q, Ma S J, Cao X P, et al. Evaluation of the cultivated land fertility and trends of soil nutrient status of Huzhu County in Qinghai Province in the past 10 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):112-120.
- [2] 陈兴,吴开彬,王军,等.贵州省仁怀市耕地土壤养分地球化学特征及其影响因素研究[J].中国地质,2022,49(3):860-879.  
Chen X, Wu K B, Wang J, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of soil nutrients in cultivated land in Renhuai, Guizhou Province[J]. Geology in China, 2022,49(3):860-879.
- [3] Reza S K, Nayak D C, Mukhopadhyay S, et al. Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and geographical information system[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017,63(11):1489-1498.
- [4] 张万涛,许明祥,李彬彬,等.复合地貌区农田土壤有机质空间变异特征及其影响因素[J].干旱地区农业研究,2021,39(1):175-181,190.  
Zhang W T, Xu M X, Li B B, et al. Spatial variability and influencing factors of farmland soil organic matter in composite landforms[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021,39(1):175-181,190.
- [5] 高浩然,周勇,刘甲康,等.湖北省两种地形区耕地土壤肥力指标空间格局与主控因素[J].水土保持通报,2022,42(5):283-292.  
Gao H R, Zhou Y, Liu J K, et al. Spatial patterns and

- main control factors of soil fertility indicators in arable land in two topographic regions of Hubei Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 283-292.
- [6] Zheng C, Yang X F, Liu Z Q, et al. Spatial distribution of soil nutrients and evaluation of cultivated land in Xuwen County[J]. PeerJ, 2022, 10: e13239.
- [7] 赵业婷, 齐雁冰, 常庆瑞, 等. 渭河平原县域农田土壤有机质时空变化特征[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 1048-1053.
- Zhao Y T, Qi Y B, Chang Q R, et al. Spatio-temporal variation of soil organic matter in farmland at a county scale in Weihe Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 1048-1053.
- [8] 尉芳, 刘京, 夏利恒, 等. 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 1097-1107.
- Wei F, Liu J, Xia L H, et al. Spatial prediction method of farmland soil organic matter in Weibei dryland of Shaanxi Province[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 1097-1107.
- [9] 郝丽婷, 吴发启, 黄土丘陵沟壑区坝地和梯田土壤养分特征与演变[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 16-22.
- Hao L T, Wu F Q. Characteristics and evolution of soil nutrients of dam land and terrace in a loess hilly area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 16-22.
- [10] 张晗, 赵小敏, 朱美青, 等. 近30年南方丘陵山区耕地土壤养分时空演变特征: 以江西省为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 58-65, 71.
- Zhang H, Zhao X M, Zhu M Q, et al. Characteristics of spatiotemporal variability of cultivated soil nutrients in the southern hilly area of China in the past 30 years: A case study of Jiangxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 58-65, 71.
- [11] Wang R M, Zou R Y, Liu J M, et al. Spatial distribution of soil nutrients in farmland in a hilly region of the Pearl River Delta in China based on geostatistics and the inverse distance weighting method[J]. Agriculture, 2021, 11(1): 50.
- [12] 王琦, 常庆瑞, 黄勇, 等. 基于 Geo-D 的陕西省 STN 空间变异因子交互影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 161-169.
- Wang Q, Chang Q R, Huang Y, et al. Driving factors and interaction of STN spatial variation in Shaanxi Province based on geo-D[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 161-169.
- [13] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1527-1539.
- Jiang Y F, Ye Y C, Guo X, et al. Spatial variability of ecological stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in farmlands of Jiangxi Province and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1527-1539.
- [14] 曹婧, 陈怡平, 江瑶, 等. 陕西省农田土壤速效钾时空变化及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 296-302, 311.
- Cao J, Chen Y P, Jiang Y, et al. Spatial and temporal variation of soil available potassium and its influencing factors in Shaanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 296-302, 311.
- [15] Shukla A K, Behera S K, Tripathi R, et al. Evaluation of spatial spreading of phyto-available sulphur and micronutrients in cultivated coastal soils[J]. PLoS One, 2021, 16(10): e0258166.
- [16] 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[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1522-1531.
- Tong T, Mei S, Liu Y, et al. Spatial variation of soil nutrient characteristics around Chaohu Lake based on GIS results[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(7): 1522-1531.
- [17] 赵晴月, 许世杰, 张务帅, 等. 中国玉米主产区土壤养分的空间变异及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(15): 3120-3133.
- Zhao Q Y, Xu S J, Zhang W S, et al. Spatial regional variability and influential factors of soil fertilities in the major regions of maize production of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(15): 3120-3133.
- [18] Chen T D, Jiao J Y, Zhang Z Q, et al. Soil quality evaluation of the alluvial fan in the Lhasa River Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. CATENA, 2022, 209: 105829.
- [19] 夏利恒, 申江龙, 孙语彤, 等. 县域耕地土壤养分时空变异特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 238-247.
- Xia L H, Shen J L, Sun Y T, et al. Characteristics of spatial and temporal variability of soil nutrients in cropland of Baishui County[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 238-247.
- [20] 胡贵贵, 杨联安, 封涌涛, 等. 基于地理探测器的宝鸡市农田土壤养分影响因子分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 71-78.
- Hu G G, Yang L A, Feng Y T, et al. Influencing Factors of Soil nutrients in Farmland of Baoji Based on Geographical Detector[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 71-78.

- [21] 芮旻,杨华,杨坤.陕西省黄河流域农业高质量发展的时空演化特征及影响机理[J].中国农业大学学报, 2021,26(5):141-152.
- Rui Y, Yang H, Yang K. Spatio-temporal evolution characteristics and impact mechanism of high-quality agricultural development of the Yellow River Basin in Shaanxi Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2021,26(5):141-152.
- [22] 姚瑶,罗朋,李京玲,等.运城市夹马口引黄灌区土壤养分空间变异特征[J].干旱区资源与环境,2023,37(2):134-141.
- Yao Y, Luo P, Li J L, et al. Spatial variation of soil nutrients in the Jiamakou Yellow River irrigation area, Yuncheng City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(2):134-141.
- [23] 李雪杰,陈杰,常帅,等.草原土壤有机质和速效养分的空间分布及主控因子分析[J].草地学报,2023,31(6):1798-1809.
- Li X J, Chen J, Chang S, et al. Spatial distribution of organic carbon and available nutrients in grassland soils and analysis of the main controlling factors[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(6):1798-1809.
- [24] 贺军奇,魏燕,高万德,等.毛乌素沙地东南缘植被 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应[J].干旱区地理, 2022,45(5):1523-1533.
- He J Q, Wei Y, Gao W D, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its response to climatic factors in the southeastern margin of Mu Us Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2022,45(5):1523-1533.
- [25] 崔晨曦,孟凡浩,罗敏,等.基于地理探测器的内蒙古耕地水资源短缺时空变化特征及驱动力分析[J].中国农业资源与区划,2023,44(1):150-161.
- Cui C X, Meng F H, Luo M, et al. Spatio-temporal change characteristics and driving factors of cultivated land water shortage in inner Mongolia based on the geographic detector model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(1):150-161.
- [26] 严玉梅,李水利,李茹,等.陕西省耕地土壤养分现状与分布特征[J].土壤通报,2019,50(6):1298-1305.
- Yan Y M, Li S L, Li R, et al. Current situation and distribution characteristics of soil nutrients in cultivated land of Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019,50(6):1298-1305.
- [27] 张向宁,王海燕,崔雪,等.土壤 pH 与养分的空间异质性及土壤肥力分析:以内蒙古旺业甸林场为例[J].干旱区资源与环境,2023,37(7):127-136.
- Zhang X N, Wang H Y, Cui X, et al. Spatial heterogeneity of soil pH and nutrients and soil fertility analysis: A case study of Wangyedian forest farm in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(7):127-136.
- [28] 李春雨,加鹏华,王树涛,等.阜平县不同海拔梯度下耕地土壤养分现状与分布特征[J].水土保持研究,2022,29(1):197-204.
- Li C Y, Jia P H, Wang S T, et al. Soil nutrient status and distribution characteristics of cultivated land under different altitude gradients in Fuping County [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(1):197-204.
- [29] 王琦,常庆瑞,落莉莉,等.陕西省农田土壤有机质时空变异与驱动因子定量研究[J].农业机械学报,2022,53(11):349-359.
- Wang Q, Chang Q R, Luo L L, et al. Spatiotemporal variation and driving factors for cultivated soil organic matter in Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):349-359.
- [30] 曹婧,陈怡平,毋俊华,等.近 40 年陕西省农田土壤有机质时空变化及其影响因素[J].地球环境学报,2022,13(3):331-343.
- Cao J, Chen Y P, Wu J H, et al. Temporal and spatial variation of soil organic matter in Shaanxi Province in the past 40 years and its influencing factors[J]. Journal of Earth Environment, 2022,13(3):331-343.