

县域耕地土壤养分时空变异特征研究

夏利恒^{1,2,3}, 申江龙^{1,3}, 孙语彤^{1,3}, 刘京²

(1.陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司,陕西 西安 710075;2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;

3.陕西省土地工程建设集团有限责任公司,陕西 西安 710075)

摘要:土壤养分空间变异研究是精准农业实施的前提,对提高粮食作物单位面积产量和保护农业生态环境具有重要作用。为掌握陕西渭北旱塬区土壤养分时空变异规律,综合空间自相关和重心模型,分析1980—2007年、2007—2017年白水縣耕地土壤有机质(SOM)、速效磷(AP)和速效钾(AK)的时空变异特征。结果表明:(1)研究区土壤SOM的平均含量分别增加了1.29、3.22 g·kg⁻¹,AP的平均含量分别增加了6.89、24.45 mg·kg⁻¹,仅有AK的平均含量呈现出先减少后增加的趋势。(2)三期耕地土壤养分的变异系数范围为30.2%~90.8%,属于中等变异。1980—2017年,耕地土壤SOM、AP和AK的全局Moran's I指数均降低,空间结构性减弱,随机因素作用增强。(3)土壤SOM、AP和AK含量均有不同程度的增加,土壤SOM含量总体呈北低南高分布,土壤AP、AK含量分布情况较为一致,呈东高西低。(4)土壤SOM含量重心在东南方向发生偏移,AP、AK含量重心在东北方向发生偏移。土壤养分标准差椭圆空间分布格局同研究区分布方向一致,转角呈现“增加-减少”的变化规律,椭圆面积减少,养分空间分布趋于集中。该研究探明了白水縣土壤养分的空间分布情况与养分重心迁移方向,为合理规划和利用土地资源与土壤养分管理提供依据。

关键词:耕地;土壤养分;重心模型;时空变异

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A

Characteristics of spatial and temporal variability of soil nutrients in cropland of Baishui County

XIA Liheng^{1,2,3}, SHEN Jianglong^{1,3}, SUN Yutong^{1,3}, LIU Jing²

(1.Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering

Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China;

2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3.Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: Study of spatial variability of soil nutrients is very important for improving the yield per unit area of food crops and protecting the agroecological environment and is a prerequisite for the implementation of precision agriculture. To understand the spatial and temporal variability of soil nutrients in the northern WeiBei Plateau region of Shaanxi, the spatial autocorrelation and center of gravity models were integrated to analyze the spatial and temporal variability characteristics of soil organic matter (SOM), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) in cultivated land in Baishui County from 1980 to 2007 and 2007 to 2017. The results showed that the average contents of soil SOM in the study area increased by 1.29 g·kg⁻¹ and 3.22 g·kg⁻¹, respectively, and the average contents of AP increased by 6.89 mg·kg⁻¹ and 24.45 mg·kg⁻¹, respectively, while only the average contents of AK had a trend of the first decrease and then increase. The coefficients of variation of soil nutrients in arable land in all three periods ranged from 30.2% to 90.8%, which was moderate variation. The global Moran's I indices of soil SOM, AP, and AK in arable land decreased from 1980 to 2017, with a weakening spatial structure and an in-

收稿日期:2022-05-05

修回日期:2022-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(42071240);陕西省土地工程地建集团公司内部科研项目(DJNY2022-36)

作者简介:夏利恒(1994-),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为农业资源利用。E-mail:18092729601@163.com

通信作者:刘京(1975-),男,宁夏贺兰人,副教授,主要从事农业资源利用研究。E-mail:jingliu@nwauf.edu.cn

crease in the role of stochastic factors. Soil SOM, AP, and AK content all increased to different degrees, and soil SOM content generally showed a low north-south high distribution, while the distribution of soil AP and AK content was more consistent, having a high east-west low distribution. The center of gravity of SOM generally shifted in the southeast direction, and the center of gravity of AP and AK generally shifted in the northeast direction. The spatial distribution pattern of the soil nutrient standard deviation ellipse was consistent with the distribution direction of the study area, and the turning angle showed an increasing-decreasing change pattern, with the ellipse area decreasing and the spatial distribution of nutrients tending to be concentrated. In summary, this study has identified the spatial distribution of soil nutrients and the direction of nutrient gravity shift, providing a basis for rational planning and use of land resources and soil nutrient management.

Keywords: cropland; soil nutrients; center of gravity model; spatio-temporal variation

耕地土壤养分是植物生长发育所必需的营养物质,是保证耕地质量和粮食产量的重要条件^[1]。土壤中有有机质(SOM)、速效磷(AP)、速效钾(AK)的含量是决定土壤肥力、农产品产量及品质的重要因素。同时,由于土壤类型、地形及人类活动等因素的综合作用,土壤养分存在高度空间变异特征^[2-3]。研究其时空变异规律对精准养分管理、促进农田生态经济效益、耕地质量的保护与提升具有重要的理论与现实指导意义。20 世纪 90 年代初期,国内学者开始主要应用地统计方法探究土壤的时空变异性^[4]。近年来,利用地统计学结合 GIS 的方法对土壤特性在时间和空间尺度上的变异研究成为热点^[5-16]。其中,陈涛等^[5]研究县域耕地土壤速效养分时空变异规律及影响因素,得到土地利用方式和人为活动与土壤养分含量变化的关系最为密切;于洋等^[11]研究渭北台塬区近 30 a 土壤速效养分的时空变异性。从现阶段已有的文献来看,大多数学者在两期土壤养分数据的基础上进行对比,研究其地区土壤养分的时空变异规律^[13-16],少部分研究仅以单时期数据进行空间变异规律分析^[17-19],目前对三期土壤养分数据进行对比的研究仍然较少。在研究方法上,少有学者利用重心模型对养分空间分布进行研究,无法全面反映养分的变化特征。本文以位于陕西渭北旱塬区白水县为例,以 1980、2007、2017 年的土壤 SOM、AP 和 AK 为研究对象,采用地统计学与 GIS 相结合的方法,利用空间自相关和半变异函数分析耕地土壤 SOM、AP 和 AK 的空间变异特征,结合重心模型探究养分的重心迁移方向,为白水县土壤养分分区指导和不同乡镇的精准施肥提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

白水县位于关中平原和陕北高原过渡区(109°16′

~109°45′ E,35°4′~35°27′ N)。全区总面积 986.6 km²,其中耕地面积 525.4 km²,占全区总面积的 53.2%。全区地势呈现西北高东南低,海拔 440~1 500 m。属温带大陆性季风气候,四季分明,年均气温 11.4℃,年均降水量 577.8 mm。由于洛河及白水河各支沟的切割,境内沟壑纵横,地形破碎,中东方向主要是黄土台塬,北部和中西方向为黄土塬,土壤类型主要以黄绵土为主。

1.2 数据来源

本研究采用三期(1980、2007、2017 年)耕地土壤 SOM、AP、AK 养分数据。1980 年的样点数据源于该年白水县第二次土壤普查资料,分别获取 SOM、AP、AK 样点数据 154、152、152 个。2007 年的样点数据源于该年全国测土配方施肥项目,共获取样点数据 156 个。2017 年的数据则为耕地质量调查与评价的样点数据,共计 73 个。三期土样均取自土壤耕层 0~20 cm,采样点分布见图 1(见 242 页)。采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质,采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-磷钼蓝比色法测定土壤速效磷,采用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAC 浸提-火焰光度法测定土壤速效钾^[17]。

1.3 数据处理及分析

1.3.1 数据处理 特异值的存在会造成连续表面的中断,直接影响变量的分布特征,影响差值的准确性。因此,本文首先采用域法识别特异值,即样本平均值 $\bar{a}$ 加减 3 倍标准差 s ,在区间 $(\bar{a} \pm 3s)$ 以外的数据均为定为异常值^[20],分别用正常最大值和最小值代替特异值。利用 SPSS 20.0 对数据进行 K-S 检验,对不符合正态分布的数据进行变换处理,选取最优正态分布拟合参数,利用最佳的 λ 值进行 BOX-COX 转换(表 1),转换后的数据均符合正态分布。BOX-COX 转换实质是一种幂转换数据处理方法,其转换公式为:

$$\begin{cases} x'_i = \ln(x_i) & \lambda = 0 \\ x'_i = \frac{x_i^\lambda - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ 为原数据经幂转换后最接近正态分布时的参数值,当 $\lambda = 0$ 时,BOX - COX 转换即为对数转换。

表 1 三期耕地土壤养分 λ 值与正态检验
Table 1 λ value of soil nutrient and normal test
of cultivated land in three periods

项目 Item	λ	P	项目 Item	λ	P	项目 Item	λ	P
SOM-1980	0.14	0.07*	SOM-2007	0.58	0.18*	SOM-2017	-0.67	0.96*
AP-1980	0.06	0.13*	AP-2007	0.02	0.20*	AP-2017	-0.10	0.99*
AK-1980	0.75	0.07*	AK-2007	0.14	0.16*	AK-2017	-0.18	0.90*

注: * 表示 $P<0.05$ 显著水平。
Note: * represent $P<0.05$ significant level.

1.3.2 空间自相关分析 空间自相关是指同一个变量在不同空间位置上存在的潜在依赖性,是对研究变量空间相邻位置间相关性进行检验的一种统计方法^[21]。在判断空间自相关性时,现常用全局 Moran's I 指数来反应研究区的空间自相关性,其计算公式为:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X}) (X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

式中, n 为总样本数; W_{ij} 为对称二项分布空间权重矩阵; X_i 和 X_j 分别为空间变量 X 在不同位置 i 和 j 上的实测值^[22-23]。

1.3.3 半变异函数分析 半变异函数(又称半方差函数)是地统计分析中常用的函数,可以根据已知样本点对研究区的空间变异特征进行较为准确的描述^[17]。半变异函数可以揭示变量的内在联系,利用不同距离、不同方向空间点位间的关系得到变量的空间分布规律,使空间插值更精确^[11],其计算公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

式中, h 为采样点的空间间隔; $N(h)$ 为间隔距离为 h 的样点数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为空间变量 $Z(x)$ 在不同位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的实测值^[24-25]。

1.3.4 重心模型及标准差椭圆 重心模型多用来研究某地理要素空间位置的变化过程,该模型通过重心迁移的方向、距离和速度反映空间要素的变化趋势。本文利用重心模型揭示养分的空间聚集特征和变化趋势^[26]。计算公式为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i X_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (4)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i Y_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (5)$$

式中, $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 为研究初期的养分坐标; M_i 为第 i 个样点的养分含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); X_i 、 Y_i 表示第 i 个样点的养分坐标。

标准差椭圆能够直观地反映土壤养分的聚集状态及偏移趋势,主要由转角 θ 、沿主轴(长轴)的标准差和沿辅轴(短轴)的标准差构成。椭圆的长半轴表示养分分布的方向,短半轴表示养分分布的范围。本文在重心模型的基础上,构建标准差椭圆反映土壤养分的空间格局。

2 结果与分析

2.1 土壤养分描述性统计

由表 2 可知,1980 年研究区耕地土壤 SOM、AP、AK 的平均含量分别为 $11.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $158.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;2007 年分别为 $12.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $11.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $135.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;2017 年分别为 $16.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $36.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $258.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 1980—2007 年的 28 a 间,土壤 SOM 和 AP 含量明显升高,AK 含量明显降低。2007—2017 年,三种养分的含量分别增加 $3.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $24.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $123.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,数据均通过 t 检验,呈显著性差异。

研究区三期耕地土壤养分的变异系数在 30.2%~90.8%之间,属于中等变异。1980—2007 年,土壤 SOM、AP、AK 的变异系数均有所减小,分别由 47%、85%、30.2%减小到 37.3%、60.1%、43.3%,且随时间的变化变异性均呈减小的趋势;2007—2017 年,土壤 SOM、AP、AK 的变异系数分别增加至 52.1%、90.8%、56.9%,变异性均呈增加趋势。

2.2 土壤养分时空变异特征

利用 GS+9.0 软件,选用指数、球状和线性三种半方差模型分别对 1980、2007、2017 年耕地 SOM、AP 和 AK 进行拟合,分别建立最优半方差理论模型,得到三期耕地土壤养分的地统计参数,并计算得到全局 Moran's I ,如表 3 所示。

2.2.1 空间自相关分析 由表 3 可知,1980—2017 年耕地土壤 SOM、AP、AK 的全局 Moran's I 指数分别由 0.35、0.41、0.44 降低到 0.31、0.27、0.21。通过将全局 Moran's I 指数标准化, Z 值均大于 2.56,说明当前采样密度下,三期耕地土壤 SOM、AP、AK 呈极显著空间正相关。通过进一步比较 Z 值,1980—2017 年土壤 SOM、AP、AK 的 Z 值分别由 32.92、32.47、35.48 减少到 15.40、24.96、17.56,说明在 38 a 间,研究区耕地土壤养分的空间结构减弱,随机性

增强。影响其随机变异性主要有以下两种原因:一方面,由于家庭联产承包责任制的实施,耕地分产到户,农民自主采用不同管理和耕种措施导致;另一方面,由于 2005 年开启新一轮测土配方施肥,白水 县根据土壤类型、土壤养分条件、作物需肥规律

和需肥量等,在施用有机肥的基础上选择氮、磷、钾及中微量元素等肥料,使得耕地土壤养分的随机变异性增强。

2.2.2 变异函数分析 由图 2 可见,随间隔距离 h 增加,各养分的半方差持续增加,显现出鲜明结构特

表 2 三期耕地土壤养分描述统计
Table 2 Soil nutrient description statistics of cultivated land in three periods

项目 Item	样本数 Samples	平均值±标准差 Mean±standard deviation	最小值 Min	最大值 Max	全距 Range	变异系数/% Coefficient of variation
SOM-1980/(g·kg ⁻¹)	154	11.70±5.50	0.40	46.32	45.92	47.0
AP-1980/(mg·kg ⁻¹)	152	5.11±4.34	0.20	37.50	37.30	85.0
AK-1980/(mg·kg ⁻¹)	152	158.68±47.91	3.00	373.00	370.00	30.2
SOM-2007/(g·kg ⁻¹)	156	12.49±4.66	2.20	31.40	29.20	37.3
AP-2007/(mg·kg ⁻¹)	156	11.93±7.28	1.60	49.80	48.20	60.1
AK-2007/(mg·kg ⁻¹)	156	135.64±58.72	32.00	327.00	295.00	43.3
SOM-2017/(g·kg ⁻¹)	73	16.21±8.45	7.96	77.33	69.37	52.1
AP-2017/(mg·kg ⁻¹)	73	36.45±33.11	5.00	155.00	150.00	90.8
AK-2017/(mg·kg ⁻¹)	73	258.88±147.35	82.00	861.00	779.00	56.9

表 3 三期土壤养分的半方差模型与 Moran's I 指数
Table 3 Semi-variance model of soil nutrients in three periods and Moran's I index

项目 Item	模型 Model	块金值 Nugget (C ₀)	基台值 Sill (C ₀ +C)	块基比/% Nugget/sill	变程/m Range	r ²	Moran's I	Z
SOM-1980	E	0.12	0.248	48.30	4410	0.865	0.35 **	32.92
AP-1980	E	1.81	4.21	42.95	6470	0.995	0.41 **	32.47
AK-1980	E	0.016	0.037	42.27	5050	0.957	0.44 **	35.48
SOM-2007	E	0.496	1.21	41.03	8890	0.994	0.21 **	32.36
AP-2007	L	0.165	0.217	76.14	17350	0.867	0.26 **	24.89
AK-2007	L	0.277	0.46	66.56	16280	0.816	0.17 **	19.06
SOM-2017	E	133.26	270.6	49.24	7460	0.775	0.31 **	15.40
AP-2017	E	0.24	0.422	56.88	9950	0.824	0.27 **	24.96
AK-2017	E	0.061	0.128	47.64	11800	0.785	0.21 **	17.56

注: ** 表示 $P<0.01$ 显著水平。
Note: ** represent $P<0.01$ significant level.

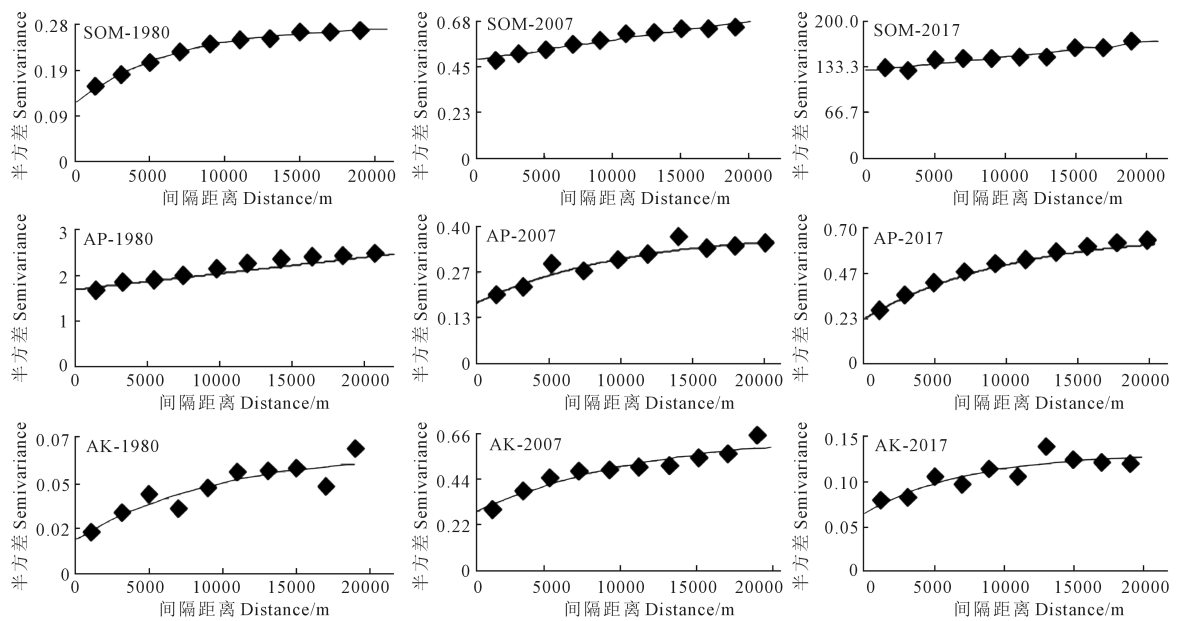


图 2 三期土壤养分的半方差图
Fig.2 Semivariogram of soil nutrients in three periods

点,表明不同时期特定采样密度和样点分布条件下,不同类型土壤养分在相邻点位间存在较明显空间相关。

由表 3 可见,除 2007 年的土壤 AP 和 AK 符合线性模型 (line),其他最佳拟合模型均符合指数模型 (exponential),决定系数 (r^2) 在 0.995~0.785 之间,均接近于 1,说明半变异函数拟合较好。除 AP-2007 块基比为 76.14% 以外,其他养分块基比均在 25%~75% 之间,表现为中等程度的空间自相关。块金值与基台值的比值表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例,1980—2017 年,耕地土壤 SOM、AP、AK 的块基比分别增大到 49.24%、56.88% 和 47.64%,说明空间结构减弱,随机变异性增强,整体分布趋向复杂,这与空间自相关分析结果一致。

2.3 耕地土壤养分时空分布特征分析

2.3.1 耕地土壤养分空间分布特征 利用 ArcGIS 中普通克里格插值工具,使用从 GS+中得到的拟合

模型和最优地统计参数(块金值、基台值、块基比和变程),分别对 1980、2007、2017 年的耕地土壤 SOM、AP、AK 进行插值,其空间分布图如图 3 所示。

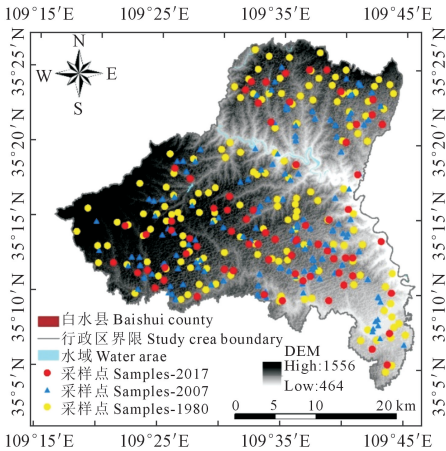


图 1 土壤样点分布图

Fig.1 The map of soil sample distribution

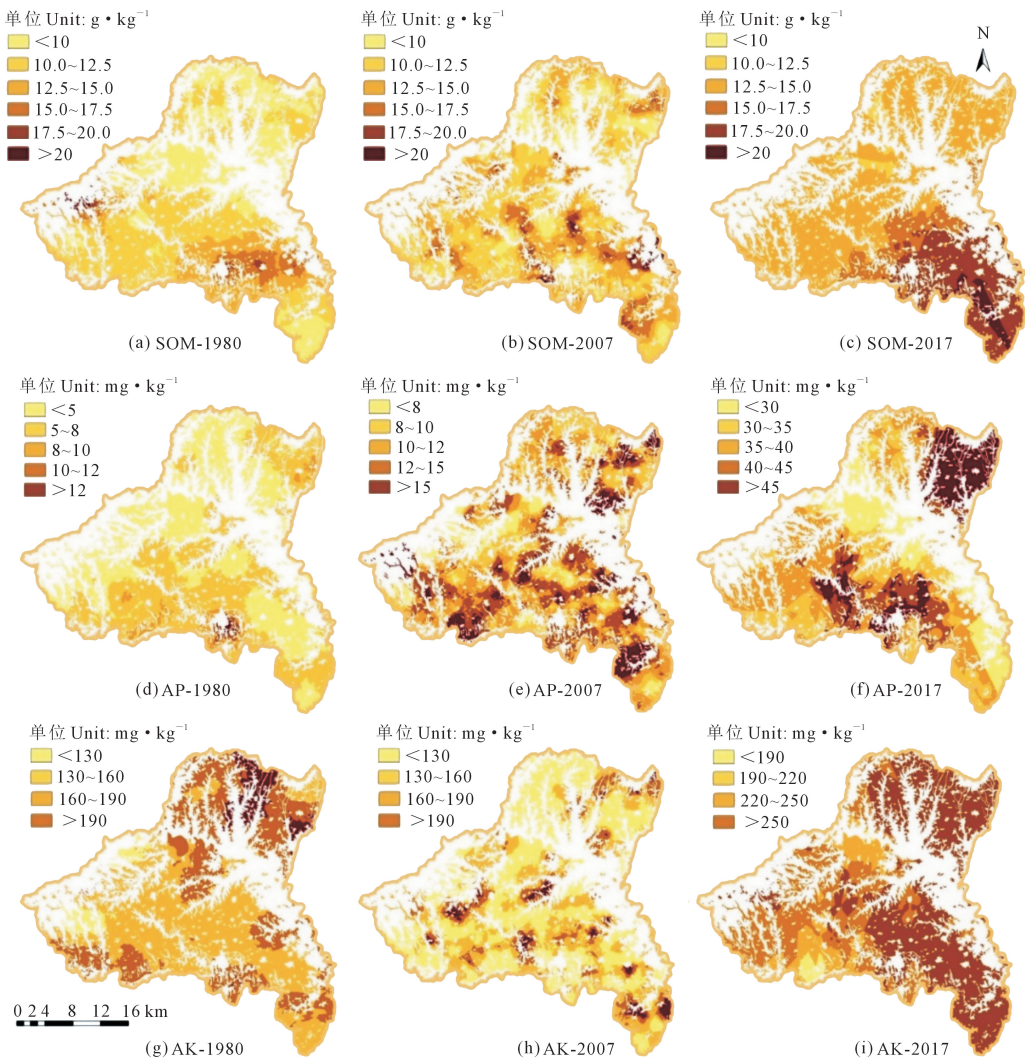


图 3 三期土壤养分空间分布图

Fig.3 Spatial distribution map of soil nutrients in three periods

由图 3 可以看出,三期土壤 SOM 含量空间分布相似,均呈现出北低南高的分布特征。1980 年研究区大部分地区土壤 SOM 含量处于中低水平,含量小于 $12.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积达 400 km^2 ,含量大于 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积仅有 1.47 km^2 ;2007 年研究区土壤 SOM 含量有所提升,含量小于 $12.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积达 296.26 km^2 ;2017 年研究区土壤 SOM 含量小于 $12.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积减少到 13.5 km^2 ,含量大于 $17.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积有 129.5 km^2 ,主要集中在研究区的东南部。相对于 2007 年土壤 SOM 的含量有大幅度的提高。

1980 年土壤 AP 含量偏低,全区大部分地区含量小于 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅有研究区南部含量较高。2007 年土壤 AP 含量有所增长,含量小于 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积减少到 164.7 km^2 ,含量大于 $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积增加到 58.08 km^2 ,但分布较为分散,主要分布在研究区东南地区。相比 1980 年有了一定程度的提高。2017 年土壤 AP 含量较 2007 年有大幅度的增长,研究区土壤 AP 含量整体大于 $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1980 年研究区土壤 AK 含量由南向北呈增加趋势,AK 含量小于 $130\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积仅有 17.02 km^2 。2007 年土壤 AK 含量小于 $130\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积达 270.7 km^2 ,相比 1980 年有很大程度的减少。

仅有少部分地区含量较高。2017 年土壤 AK 含量大于 $250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积有 288.37 km^2 ,占总面积的 54.9% ,整体分布同样呈东高西低分布。相比 2007 年,土壤 AK 的含量有了显著的提高。

2.3.2 耕地土壤养分时空变化 从表 4 和图 4(见 245 页)可以看出,1980—2007 年土壤 SOM 与 AP 含量呈增加趋势,AK 含量呈降低趋势。土壤 SOM 含量升高的面积为 383.28 km^2 ,占研究区耕地面积的 73% 。其中,增幅大于 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积有 91.59 km^2 ,主要分布在地势较高的地区,其原因是人为因素影响小,SOM 消耗少的同时土壤里不断积累的动植物腐殖质增加了 SOM 含量。土壤 SOM 含量降低的面积为 142.21 km^2 ,仅占全区耕地面积的 27% 左右,主要位于研究区南部,可能由于耕地利用程度有所提高,有机肥施用程度低的原因所致。对于土壤 AP,增幅主要集中在 $0\sim 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,占全区耕地面积的 87% ,导致 AP 含量普遍升高的原因可能是实行家庭承包责任制以来,耕地分到每户,而磷肥作为底肥得到广泛使用,另外,农户的精耕细作和设施的改善也使 AP 的含量有所提升。对于土壤 AK,大部分地区含量减少,其中 AK 含量减少大于 $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积为 78.34 km^2 ,占研究区耕地面积的 14.9% ,主要位于研究区北部,仅有少部分地区含量升高,且分布较为分散。

表 4 1980—2007 年土壤养分不同增幅的土壤面积及其比例						
Table 4 Soil area and its proportion of soil nutrient increase during 1980—2007						
项目 Item	面积、比例和分级标准 Area,percent and classification standard	增幅分级 Soil nutrient content raised classification				
有机质 SOM	分级 Grading/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	< -2	-2~0	0~2	2~4	> 4
	面积 Area/ km^2	52.51	89.70	162.11	129.58	91.59
	比例 Proportion/%	9.99	17.07	30.85	24.66	17.43
速效磷 AP	分级 Grading/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	-5~0	0~5	5~10	10~15	> 15
	面积 Area/ km^2	3.44	175.09	282.71	52.27	11.98
	比例 Proportion/%	0.65	33.32	53.80	9.95	2.28
速效钾 AK	分级 Grading/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	< -60	-60~-30	-30~0	0~30	> 30
	面积 Area/ km^2	78.34	146.10	186.43	83.19	31.43
	比例 Proportion/%	14.91	27.80	35.48	15.83	5.98

表 5 2007—2017 年年土壤养分不同增幅的土壤面积及其比例						
Table 5 Soil area and its proportion of soil nutrient increase during 2007—2017						
项目 Item	面积、比例和分级标准 Area,percent and classification standard	增幅分级 Soil nutrient content raised classification				
有机质 SOM	分级 Grading/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	< 0	0~3	3~6	6~9	9~12
	面积 Area/ km^2	87.84	211.24	153.18	63.41	9.83
	比例 Proportion/%	16.71	40.20	29.15	12.07	1.87
速效磷 AP	分级 Grading/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
	面积 Area/ km^2	20.27	116.20	227.41	128.64	32.98
	比例 Proportion/%	3.86	22.11	43.27	24.48	6.28
速效钾 AK	分级 Grading/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	< 0	0~60	60~120	120~180	> 180
	面积 Area/ km^2	0.39	41.61	195.28	244.08	44.14
	比例 Proportion/%	0.07	7.92	37.16	46.45	8.40

从表 5 和图 4 可以看出,2007—2017 年耕地土壤 SOM、AP 和 AK 含量整体呈增加趋势,其中 AP 与 AK 的增幅较大。其原因可能是近年来农户更加注重对农地增施有机肥和复合肥并进行精耕细作。并且农户增强了对土地管理的意识,降低了人为因素对土地内部结构的破坏。其中,土壤 SOM 含量在研究区东南部低海拔地区增幅较大,其增幅在 $6\sim 12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积有 73.24 km^2 。大部分地区呈增加趋势,总增加面积占全区耕地面积的 83.29%。仅有少部分地区含量减少。对于土壤 AP,全区呈增加趋势。其中增幅在 $20\sim 30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间的面积有 227.41 km^2 ,占全区耕地面积的 43.27%,增幅较大达到 $40\sim 50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的面积有 32.98 km^2 ,主要分布在史官镇,中部地区小幅度增长。2007 年以来农业科学技术的大力推广,合理施用磷肥,使土壤 AP 含量大幅度升高。对于土壤 AK,研究区大部分呈增加趋势,且增幅较大,其中增幅在 $60\sim 120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $120\sim 180\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的总面积达到了 439.36 km^2 ,占全区耕地面积的 83.61%,主要分布在研究区北部与东南部。

2.4 重心模型和标准差椭圆

采用重心模型分别获取各时期的养分重心迁移方向和距离,结果如表 6(见 246 页)与图 5 所示。1980—2017 年,SOM 重心持续向东南方向偏移,总移动距离 $4\ 502.07\text{ m}$,由尧禾镇移动到雷牙镇;AP 重心经历“东南—东北”迁移;AK 重心经历“南—东北”迁移。由此可以看出,由于东南方向地势较低,人们便于耕作,所以 SOM 重心整体向东南方向偏移,2007—2020 年,AP 和 AK 重心向东北部迁移,主要由于东北部养分含量迅速升高。通过对乡镇耕地养分重心迁移分析可知,SOM 重心在西固镇偏移距离最大,偏移距离大于 800 m ,林皋镇偏移距离最小,呈现东快西慢趋势;AP 和 AK 重心均在史官镇偏移距最大,不同的是,AP 重心在尧禾镇和西固镇偏移距离较小,AK 重心则在杜康镇偏移距离最小。综上可知,研究区 37 a 以来,SOM 重心整体向东南方向发生偏移,AP 和 AK 重心整体向东北方向发生偏移。

由表 7(见 246 页)和图 5 可以看出,研究区标准差椭圆变化具有一定的方向性,这与重心的转移存在一定的相关性。在整个研究时间段,SOM 转角均呈现“增加—减少”的变化规律,东南方向的空间分布不断增强。从标准差椭圆的变化面积来看,面积逐渐减少,表明研究区养分空间分布逐步趋于集中,SOM 养分含量更加趋于稳定;AP 和 AK 转角同

与 SOM 转角呈现相同变化规律,养分含量更加聚集且东北方向的空间分布不断增强。

3 讨论与结论

3.1 土壤养分时空变异因素分析

从研究区耕地土壤养分的变异状况来看,3 个时期土壤养分变异均属于中等变异,与陈涛等^[5]在渭北旱塬区的研究一致。土壤 AP 的变异程度最大,这与吴美玲等^[2]在黔西北农业园区的研究结果一致。刘国顺等^[6]在缓坡烟田的研究结果也显示,土壤 AP 的变异程度最高。综合前人研究与本研究成果,得出土壤 AP 的变异程度一般比 SOM 和 AK 大。造成这种现象的原因可能是磷素极易被土壤固定,研究区不同地块土壤特性的细微差异可能会导致固定磷含量的差异,进而影响土壤中速效磷的含量^[27]。通过 GS+进行半变异函数分析得到的半变异函数模型拟合程度最高的是 1980 年的养分数据,这与于洋等^[11]的研究结果一致。文中全局 Moran's I 指数和半变异函数和两种分析方法的结果较一致,1980—2017 年耕地土壤 SOM、AP、AK 的全局 Moran's I 指数均减少,说明其空间结构减弱,空间分布趋于破碎,与于洋等^[11]在渭北台塬区的研究和赵业婷等^[18]在西安市郊区的研究结果相吻合。

本研究区土壤 AP、AK 的分布规律较为相似。在时间变化上,高义民^[28]研究结果显示渭北旱塬区 25 a 以来土壤 SOM 和速效养分含量均增加。研究区 1980—2007 年土壤 SOM 和 AP 的含量均呈增加趋势,土壤 AK 却呈减少趋势。究其原因,可能由于研究区苹果的广泛种植,钾作为一种能够提高果实品质的元素,农户在施用钾肥施用量不合理导致土壤 AK 含量大面积降低。2007—2017 年研究区土壤养分含量均增加,原因可能是近年来农户更加注重对农地增施有机肥和复合肥并进行精耕细作,这与刘芬等^[10]研究结果相一致。在全国各大苹果产区中,白水是唯符合苹果生产区七项指标的县域,拥有十分优越的自然条件,因此苹果成为该县主要农产业。对于苹果而言,土壤中有机的含量是非常重要的,它不但可以提高苹果品质,还可以培肥土壤,改善土壤环境。研究区土壤有机质含量均呈递增趋势,这对于提高苹果产量、农村居民收入和农业可持续发展提供了强有力保障。

3.2 对策与建议

本研究通过对两个阶段的土壤养分变异情况进行分析,更加深入地了解到实行家庭联产承包责任制和测土配方施肥对土壤养分变化的影响,重心

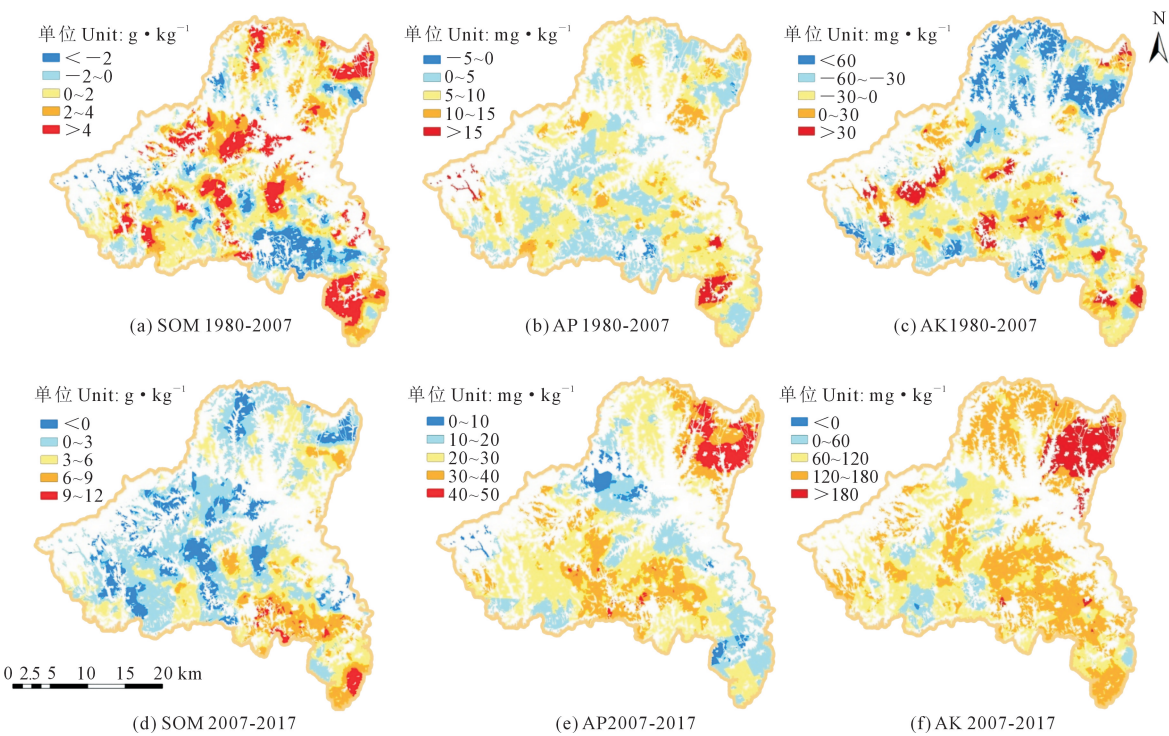


图 4 1980—2007 年与 2007—2017 年土壤养分变化图

Fig.4 Change maps of soil nutrient during 1980–2007 and 2007–2017

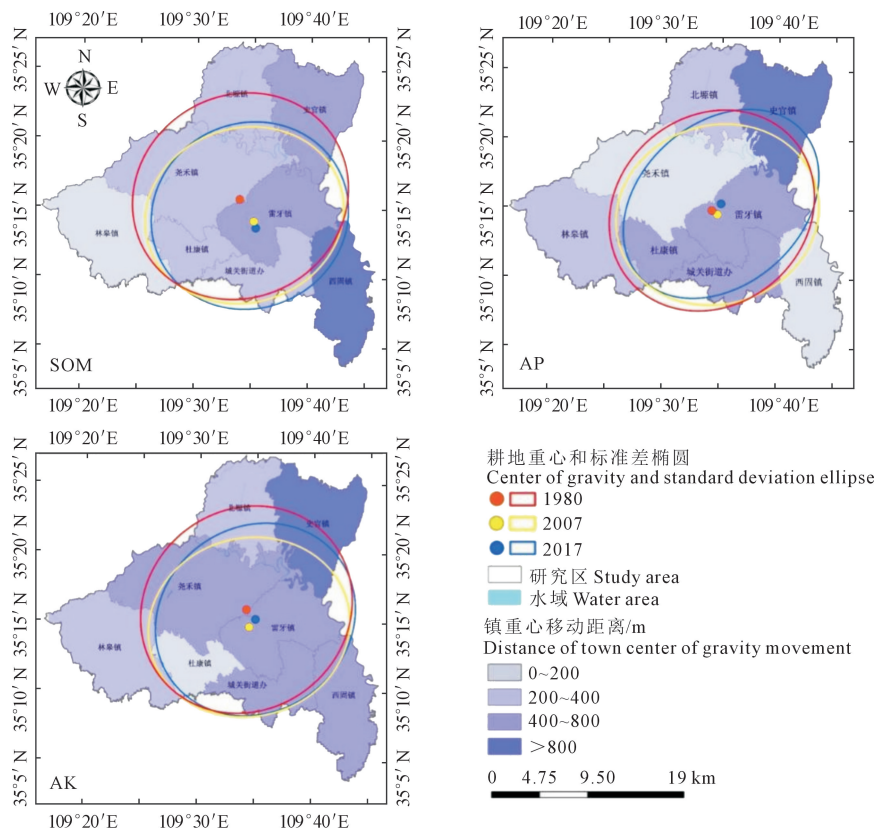


图 5 1980—2017 年土壤养分重心迁移

Fig.5 Soil nutrient gravity shift during 1980–2017

表 6 1980—2017 年土壤养分重心迁移
Table 6 Soil nutrient gravity shift during 1980–2020

重心迁移 Shift of gravity center	SOM		AP		AK	
	1980–2007	2007–2017	1980–2007	2007–2017	1980–2007	2007–2017
移动方向 Moving direction	东南 Southeast	东南 Southeast	东南 Southeast	东北 Northeast	南 South	东北 Northeast
移动距离/m Movement distance	3579.31	922.76	880.07	1488.92	2489.22	1311.34

表 7 1980—2017 年土壤养分标准差椭圆参数变化
Table 7 Changes in standard deviational ellipse parameters for soil nutrients during 1980–2020

参数 Parameter	SOM			AP			AK		
	1980	2007	2017	1980	2007	2017	1980	2007	2017
转角 Rotation/(°)	56.32	72.63	61.98	45.68	72.54	44.75	47.65	76.13	50.81
沿 x 轴标准差 Standard deviation along the x-axis/km	14.72	13.38	13.29	14.43	13.66	10.77	14.60	13.51	13.79
沿 y 轴标准差 Standard deviation along the y-axis/km	13.48	11.63	12.32	12.61	11.91	14.55	13.34	11.89	12.31
椭圆面积 Ellipse area/km ²	623.69	489.24	514.61	572.28	511.53	492.45	612.31	504.85	533.48

模型能够更加具有阶段性的判断研究区养分含量的重心变化情况^[27],对整个区域的养分均衡有一个全面性的了解,从而能够对白水縣整体土壤养分管理分区进行具有针对性的指导;通过对各个乡镇的养分重心进行分析,得出不同乡镇的养分重心迁移距离,了解耕地养分的稳定性,为不同乡镇的精准施肥提供支持。

本研究表明,2007—2017 年研究区土壤 SOM、AP、AK 含量增幅过大,土壤 SOM 主要在研究区东南部增幅较大,AP 和 AK 在研究区北部增幅较大,可能由于人类活动较为频繁且化学肥料的过量施用,特别是人们为了追求效益,过量施用氮肥磷肥,使土壤养分含量较高,破坏土壤内部结构,不利于农作物生长发育与农业可持续发展。因此,应率先控制研究区北部地区的化肥施用,并在稳定施用氮肥、磷肥、钾肥的基础上注重中微量元素的补给。通过开展土壤测试、肥效试验等高效利用养分,综合考虑土壤养分的丰缺程度、合理的目标产量、自然环境等因素调整养分投入比例,逐步建立既保证作物增产又保护环境的施肥指标体系。除此之外,在保证耕作地区土壤养分含量充足的情况下,应合理开发中海拔地区耕地,以提高耕地利用率。

参 考 文 献:

[1] MATÍAS L, CASTRO J, ZAMORA R. Soil-nutrient availability under a global-change scenario in a Mediterranean mountain ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(4): 1646-1657.

[2] 吴美玲,田晋文. 基于 GIS 和地统计学的黔西北农业园区土壤养分空间变异特征研究[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(17): 48-53.

WU M L, TIAN J W. Spatial variation characteristics of soil nutrients in agricultural demonstration zone of northwest in Guizhou based on

GIS and geostatistics[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(17): 48-53.

[3] 司涵,张展羽,吕梦醒,等. 小流域土壤氮磷空间变异特征分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 90-96.

SI H, ZHANG Z Y, LYU M X, et al. Spatial variability of soil nitrogen and phosphorus in small watershed[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(3): 90-96.

[4] 梁春祥,姚贤良. 华中丘陵红壤物理性质空间变异性的研究[J]. *土壤学报*, 1993, (1): 69-78.

LIANG C X, YAO X L. Spatial variability of physical properties of red soil in hilly land of central China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, (1): 69-78.

[5] 陈涛,常庆瑞,刘京,等. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 554-564.

CHEN T, CHANG Q R, LIU J, et al. Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable lands of Heyang County in South Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 554-564.

[6] 刘国顺,常栋,叶协锋,等. 基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(8): 2586-2595.

LIU G S, CHANG D, YE X F, et al. Spatial variability characteristics of soil nutrients in tobacco fields of gentle slope based on GIS[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2586-2595.

[7] 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.

[8] 郭安廷,崔锦霞,许鑫,等. 基于 GIS 与地统计的土壤养分空间变异研究[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(23): 72-79.

GUO A T, CUI J X, XU X, et al. Spatial distribution of soil nutrients based on GIS and geostatistics[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(23): 72-79.

[9] 李海强,郭成久,蔡楚雄,等. 水土保持措施对坡耕地土壤养分时空变异影响[J]. *土壤通报*, 2017, 48(3): 707-714.

LI H Q, GUO C J, CAI C X, et al. Effect of soil and water conservation measures on temporal and spatial variability of soil nutrients in sloping farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(3):

- 707-714.
- [10] 刘芬,王小英,赵业婷,等. 渭北旱塬土壤养分时空变异与养分平衡研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 110-119.
LIU F, WANG X Y, ZHAO Y T, et al. Spatial and temporal variation of soil nutrient and nutrient balance status in Weibei rainfed highland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 110-119.
- [11] 于洋,赵业婷,常庆瑞. 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1251-1261.
YU Y, ZHAO Y T, CHANG Q R. Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei tableland area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1251-1261.
- [12] CHANDRA R, PRUSTY B A K, AZEEZ P A. Spatial variability and temporal changes in the trace metal content of soils: implications for mine restoration plan[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(6): 3661-3671.
- [13] 赵业婷,常庆瑞,李志鹏,等. 1983—2009年西安市郊区耕地土壤有机质空间特征与变化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 132-140, 296.
ZHAO Y T, CHANG Q R, LI Z P, et al. Spatial characteristics and changes of soil organic matter for cultivated land in suburban area of Xi'an from 1983 to 2009[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(2): 132-140, 296.
- [14] STYRISHAVE B, BJORKLUND E, JOHNSEN A, et al. Study on spatial soil ecology based on spatial heterogeneity analysis of soil organisms[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(3): 969-977.
- [15] 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.
- [16] 吴驳,吴发启,佟小刚,等. 近40年泥河沟流域耕地土壤磷素含量的时空变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 851-858.
WU B, WU F Q, TONG X G, et al. Spatio-temporal variability of phosphorus content in cultivated soils in Nihegou watershed in recent 40 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(5): 851-858.
- [17] 张建杰,李富忠,胡克林,等. 太原市农业土壤全氮和有机质的空间分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3163-3172.
ZHANG J J, LI F Z, HU K L, et al. Spatial characteristics and impact factors of soil total nitrogen and soil organic matter in Taiyuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3163-3172.
- [18] 赵业婷,李志鹏,常庆瑞,等. 西安市粮食主产区耕层土壤速效养分空间特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1376-1385.
ZHAO Y T, LI Z P, CHANG Q R, et al. Spatial characteristics of soil available nutrients in the major grain-producing region of Xi'an, China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(6): 1376-1385.
- [19] 廖超林,傅灵芝,张鹏博,等. 湘中南土地整理后烟田土壤肥力指标评价及空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 105-111.
LIAO C L, FU L Y, ZHANG P B, et al. Assessment and spatial variation of soil fertility indices in tobacco field after land consolidation in central-southern Hunan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 105-111.
- [20] 于雪,贾小旭,黄来明,等. 黄土区不同土层土壤容重空间变异与模拟[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 55-64.
YU D X, JIA X X, HUANG L M, et al. Spatial variation of soil bulk density in different soil layers in the loess area and simulation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 55-64.
- [21] 项颂,万玲,庞燕. 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 160-170.
XIANG S, WAN L, PANG Y. Spatial-temporal variation of inflow river water quality under land use effect[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(1): 160-170.
- [22] 王国芳,张吴平,毕如田,等. 县域尺度农田深层土壤有机质的估算及空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 122-131.
WANG G F, ZHANG W P, BI R T, et al. Estimation and spatial variability of organic matter in deep soil of farmland at county scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 122-131.
- [23] 冒小栋,刘琼芳. 江西省人口分布空间自相关分析[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(2): 131-138.
MAO X D, LIU Q F. Spatial autocorrelation analysis of population distribution in Jiangxi Province[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(2): 131-138.
- [24] 于雷,魏东,王惠霞,等. 江汉平原县域尺度土壤有机质空间变异特征与合理采样数研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 855-863.
YU L, WEI D, WANG H X, et al. Spatial variability of soil organic matter and appropriate number of samples on county scale in Jiangnan plain[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 855-863.
- [25] 任加国,王彬,师华定,等. 沱江上游支流土壤重金属污染空间相关性及其变异解析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 530-541.
REN J G, WANG B, SHI H D, et al. Spatial correlation and variation analysis of soil heavy metals contamination in upper source tributary of Tuojiang River, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(3): 530-541.
- [26] 夏利恒,刘京,尉芳,等. 陕西渭北旱塬区耕地时空格局变化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 256-264.
XIA L H, LIU J, WEI F, et al. Spatiotemporal pattern change of cultivated land in Weibei Dryland of Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 256-264.
- [27] 麦尔哈巴·尼加提,戴岳,师庆东,等. 准噶尔盆地东南缘荒漠灌丛盐生假木贼周围土壤理化性质研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(7): 38-44.
NIJAT M E H B, DAI Y, SHI Q D, et al. Physical and chemical properties of soil at southeastern edge of anabasis salsa in Junggar Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 38-44.
- [28] 高义民. 陕西渭北苹果园土壤养分特征时空分析及施肥效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
GAO Y M. Study on spatio-temporal characteristic of soil nutrient and effect of fertilization in apple orchard of Shaanxi Weibei area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013.