

黄土高原北部典型县域耕地土壤碳氮时空变异特征及影响因素*

高静^{1,2}, 李建华^{1,2}, 张强^{1,2}, 郑必昭³, 王瑞³, 蒙秋霞^{1,2},
郜春花^{1,2}, 徐明岗^{1,2†}

(1.山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030800; 2.山西农业大学生态环境产业技术研究院/土壤环境与养分资源山西省重点实验室, 太原 030031; 3.山西省耕地质量监测保护中心, 太原 030001)

摘要: 黄土高原生态环境脆弱, 耕地质量的变化直接影响土地生产力的高低。选取其北部典型县域——天镇县, 研究长时期耕地土壤有机质和全氮的时空演变规律及其影响因素, 为黄土高原耕地质量提升和农业生态环境保护提供理论依据。基于 1983 年、2008 年和 2019 年耕地质量数据, 运用地统计学等方法分析天镇县有机质和全氮的时空演变特征。结果发现: (1) 36 年 (1983—2019 年) 来, 天镇县土壤有机质和全氮含量呈现整体上升、后期快速增加的变化特征。有机质和全氮含量的年均增加量前期 (1983—2008 年) 较低, 分别为 0.20 g·kg⁻¹ 和 0.01 g·kg⁻¹, 在后期 (2008—2019 年) 较高, 分别为 0.29 g·kg⁻¹ 和 0.03 g·kg⁻¹。碳氮比呈现前期无显著变化, 后期显著降低。(2) 36 年来土壤有机质和全氮的块基比均提升至高于 25%, 表明地形等自然因素影响逐渐减弱, 施肥等人为因素影响增强。(3) 土壤有机质和全氮的空间分布特征相似, 呈现西部低、东部高的格局, 西北部和中部的变化速度快。综上, 36 年 (1983—2019 年) 来, 施肥及秸秆还田等因素是导致天镇县有机质和全氮含量变化的主要因素, 因此, 结合当地条件增施有机肥、推广秸秆还田并合理施用氮肥能快速提升耕地土壤肥力。

关键词: 黄土高原; 天镇县; 有机质; 全氮; 时空演变

中图分类号: S153.6 文献标志码: A

Spatial and Temporal Variation of Soil Carbon and Nitrogen in Typical Counties of North Loess Plateau and Influencing Factors

GAO Jing^{1,2}, LI Jianhua^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, ZHENG Bizhao³, WANG Rui³, MENG Qiuxia^{1,2}, GAO Chunhua^{1,2}, XU Minggang^{1,2†}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030800, China; 2. Academy of Eco-environment and Industrial Technology, Shanxi Agricultural University; Shanxi Province Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Taiyuan 030031, China; 3. Shanxi Farmland Quality Monitoring and Protection Center, Taiyuan 030001, China)

*山西省重点研发计划项目 (202102140601010) 和山西省科技合作交流项目 202104041101002) Supported by the Key Research and Development Project of Shanxi Province, China (No. 202102140601010) and the Science and Technology Cooperation and Exchange Project of Shanxi Province, China (No. 202104041101002)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: xuminggang@caas.cn

作者简介: 高静 (1999—), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 从事耕地土壤质量研究。E-mail: 1131320695@qq.com

收稿日期: 2022-10-05; 收到修改稿日期: 2023-03-18; 网络首发日期 (www.cnki.net):

Abstract: 【Objective】 The ecological environment of Loess Plateau is fragile and once the soil quality of cultivated land changes, it will directly affect the level of soil productivity. A long-term cultivated land in Tianzhen County, a typical county in the north of the Loess Plateau, was selected to study the spatiotemporal evolution of soil organic matter and total nitrogen and their influencing factors. 【Method】 Based on the cultivated land quality data in 1983, 2008 and 2019, the temporal and spatial evolution characteristics and distribution patterns of organic matter and total nitrogen in cultivated soil of Tianzhen County were analyzed using GIS and geostatistics methods. 【Result】 (1) In the past 36 years (1983—2019), soil organic matter and total nitrogen content in Tianzhen County showed a significant change characteristic, which increased as a whole and rose rapidly in the later period. The average annual increase of organic matter and total nitrogen content was lower in the early period (1983—2008), showing $0.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, while the number was higher in the late period (2008—2019), showing $0.29 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $0.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. In the early stage of the study period, the ratio of carbon to nitrogen showed no significant change, but showed a significant decrease in the late stage, from 9.32 in 1983 to 8.43 in 2019. (2) The semi-analysis of variance (ANOVA) results revealed that over the past 30 years, the block-base ratio of soil organic matter increased from <25% to 49.8% and the block-base ratio of soil total nitrogen increased from <25% to 38.5%. This indicated that the influence of natural factors such as topography was gradually diminished, while the influence of human factors such as fertilizer application was enhanced. (3) The spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen had similar characteristics and showed a pattern of low in the west and high in the east. From 1983 to 2008, the content of soil organic matter showed an overall increasing trend, with a significant increase in the northwest and a slow increase in other regions; total nitrogen increased significantly in the northwest and decreased in the east. Also, from 2008 to 2019, soil organic matter decreased slightly in the south while it increased in other regions; total nitrogen increased significantly in the north but more slowly in other regions. 【Conclusion】 Over the past 36 years (1983—2019), the soil organic matter and total nitrogen content in Tianzhen County showed an overall upward trend, and factors such as fertilization and straw returning to the field were the main factors leading to the changes in organic matter and total nitrogen content. Combined with the local conditions to increase the application of organic fertilizer, straw returning and rational application of nitrogen fertilizer can quickly improve the soil fertility of cultivated land. Therefore, this study can provide a theoretical basis for improving the quality of cultivated land on the Loess Plateau and protecting the agricultural ecological environment.

Key words: Loess Plateau; Tianzhen County; Organic matter; Total nitrogen; Space-time evolution

耕地是人类赖以生存的最基本生产资料^[1]。土壤有机质和全氮含量作为衡量耕地质量和土壤碳、氮库的重要指标^[2-3]，其含量高低和时空分布特征的变化会直接影响粮食产量^[4-5]。土壤有机质含量不仅是土壤肥力的重要指标之一，也表征土壤碳储量的大小，在耕地质量、环境保护等方面均发挥着至关重要的作用^[6]。氮素是植物生长需求量最大的元素，其吸收利用的主要来源是土壤^[7]；随着自然因素（气候、成土母质、土壤类型等）和人类活动（施肥方式、田间管理措施等）的改变，土壤有机质和全氮含量会发生变化，其时空演变作用存在明显差异。因此，研究土壤有机质和全氮含量的变化特征并揭示其演变规律对调控区域土壤碳氮及全球碳氮循环有重要意义。

近年来，随着地统计学和地理信息系统（GIS）技术的快速发展，各学者从不同尺度对不同区域耕地土壤有机质和全氮含量的时空变异进行了深入研究。Guo 和 Jiang^[8]通过对鄱阳湖平原农田土壤碳、氮、磷的空间变异特征进行分析，发现其变化受海拔、纬度、土壤类型、秸秆还田方式和施氮量等的影响。刘建玲等^[9]研究了 30 年 1978—2008 年来太行山山麓平原的土壤养分含量变化，发现 30 年来有机质含量增加显著，施肥是导致其增加的主要原因。廖宇波等^[10]运用 GIS、地统计学和数据统计分析方法，研究了北京市大兴区近 40 年来五个时期（1980、1990、

2000、2006、2017) 耕地有机质的时空变异特征, 发现耕地土壤有机质含量整体上升, 其主要受土壤质地、土壤类型、种植作物类型和人为耕作管理活动的影响。孙晓兵等^[11]通过对河北省曲周县耕地土壤肥力的研究发现, 由于结构性因素和随机性因素的共同影响, 2000—2018 年耕地土壤有机质和全氮的平均含量均显著增加。目前, 社会经济快速发展, 耕地面积减少、养分流失等问题日渐突出, 土壤有机质和全氮的时空变异特征研究已成为当今土壤学研究的热点之一^[12-14]。

黄土高原作为典型的生态脆弱区, 有关其土壤养分变异报道较少, 且大多集中于静态的变化, 缺乏对土壤有机质和全氮时空演变特征的研究, 无法对其农业生产提出针对性的指导意见。随着施肥措施和耕作管理等的不断更新, 黄土高原耕地土壤的有机质和全氮含量发生明显变化, 但其时空演变特征尚不明确。天镇县地处黄土高原东北部, 是国家级出口小杂粮质量安全示范区, 拥有全国无公害农产品基地县、绿色食品原料标准化生产基地县、农业标准化示范县等多个“国字招牌”, 探究其土壤有机质和全氮含量的时空演变特征对于指导黄土高原北部耕地的土壤质量提升具有重要意义。

本研究以黄土高原北部县域天镇县为研究区域, 基于 1983 年、2008 年和 2019 年三个时期的土壤采集数据, 利用经典统计学和地统计学等方法对比分析长期以来天镇县耕地土壤有机质、全氮含量及碳氮比的时空演变规律, 明确其演变特征, 为该县乃至黄土高原耕地质量提升和土地资源科学管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于中国中部偏北, 包括太行山以西、乌鞘岭以东, 秦岭以北、长城以南等广大地区, 跨山西省、陕西省北部、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区及河南省等省区, 总面积 64 万 km²。黄土高原沟壑纵横, 山地与断谷、盆地相间分布。地势起伏大, 西北高, 东南低。而天镇县位于黄土高原东北部 (40°9'8"N~40°40'35"N, 113°53'30"E~114°32'30"E), 地处晋、冀、蒙三省(自治区) 交界处, 总面积 1 718 km², 为黄土高原典型丘陵沟壑区(图 1)。其地貌复杂, 境内群山绵亘、丘陵起伏, 平原狭窄。平均海拔 1 100 m 左右, 属大陆性北温带干旱性季风气候, 四季分明, 夏短冬长, 年平均气温 6.7℃, 降水量 359 mm。成土母质为黄土质、洪积物和黄土状母质等, 土壤类型主要为栗钙土和草甸土。土壤质地包括轻壤、中壤和重壤。主要种植作物为玉米等杂粮。近 30 年来, 该区域先后开展并推广了测土配方施肥和高标准农田建设等项目。

1.2 样品采集与分析

1983 年耕层土壤性质数据来源于第二次土壤普查报告资料。由于 1983 年的土样数据无经纬度坐标记载, 但有地名描述, 在本研究中其土样位置主要依据第二次土壤普查资料描述记录的地点信息, 同时结合行政区划、地形地貌、土壤类型分布等确定, 逐一定位。共整理收集土样数据 107 组, 空间分布相对均匀, 有较好的代表性。2008 年前后和 2019 年前后的土壤数据均为实地取样和测定, 分别采集土壤样品 350 个和 148 个。采样时, 以第二次土壤普查形成的土壤类型分布图参考, 根据代表性和均匀性原则, 确定采样点位后采用 S 法采样, 每个采样点均随机采取 15~20 个土样, 充分混合后, 四分法留取 1 kg 左右样品, 并用 GPS 确定地理坐标和海拔高程, 记录经纬度, 具体采样点如图 1 所示。将采集的土样带回室内自然风干, 剔除动植物残渣等杂质并研磨备用。测定指标包括有机质 (SOM) 和全氮 (TN)。其中土壤有机质用重铬酸钾外加热法测定, 全氮采用半微量凯氏法测定。

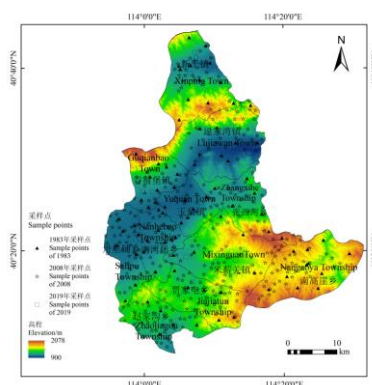


图1 1983年、2008年和2019年三个时期的采样点位分布图

Fig.1 Distribution of sampling locations for the three periods 1983, 2008 and 2019

1.3 数据处理

以全国第二次土壤普查的土壤有机质和全氮含量分级标准^[15]作参考,将土壤有机质和全氮含量分为六个等级,其中一级到六级有机质含量分别为小于 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $6\sim 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10\sim 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20\sim 30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $30\sim 40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和大于 $40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;一级到六级全氮含量分别为小于 $0.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.50\sim 0.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.75\sim 1.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.00\sim 1.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.50\sim 2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和大于 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。运用SPSS 26.0对三个时期的数据进行描述性统计分析、正态性检验和单因素方差分析。在GS+9.0中完成不同时期土壤有机质和全氮的最优半方差函数模型拟合,其空间分布图依据最优模型应用ArcGIS 10.7的普通克里格(Ordinary-Kriging)插值法进行分析。

2 结果

2.1 耕地土壤有机质和全氮的统计特征

天镇县1983年、2008年和2019年耕地土壤有机质(SOM)、全氮(TN)含量及碳氮比(C/N)的统计特征见表1。柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验(K-S检验)表明SOM经过对数转换后服从正态分布,TN和土壤C/N经过Box-cox变换后服从正态分布。天镇县1983年SOM含量在 $2.80\sim 20.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $8.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着时间的推移,SOM和全氮均呈不同程度的上升趋势。2008年和2019年SOM含量平均值分别为 11.84 和 $15.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别较1983年增加了30.09%和69.88%。SOM增加速率呈现为阶段性特征,1983—2008年SOM年均增加率为 $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,2008—2019年为 $0.29\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年增加速率为前者的1.5倍左右。1983年TN含量在 $0.16\sim 1.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.55\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2008年和2019年土壤TN含量显著增加,其平均值分别为 $0.74\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,1983—2008年土壤TN年均增加 $0.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而2008—2019年土壤TN年均增加量提高,年均增加 $0.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为前者的近三倍。1983年天镇县土壤C/N为 $6.04\sim 15.80$,平均值为9.32;与2008年相比,土壤C/N无显著变化,但在2019年,土壤C/N显著下降,较2008年的平均值降低了9.6%。三个时期SOM、TN和土壤C/N的变异系数在10%~100%之间,均属于中等程度的空间变异性。其中,土壤C/N的变异系数要略低于SOM。

表 1 1983 年、2008 年和 2019 年天镇县土壤有机质、全氮及碳氮比的描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of soil organic matter, total nitrogen and carbon to nitrogen ratio in Tianzhen County in 1983, 2008 and 2019

	有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)			全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)			C/N		
	1983	2008	2019	1983	2008	2019	1983	2008	2019
最小值 ^①	2.8	3.3	7.7	0.16	0.28	0.66	6.04	2.54	3.24
最大值 ^②	20	25.5	30	1.2	1.37	1.86	15.8	21.96	14.95
平均值 ^③	8.83c	11.84b	15.00a	0.55c	0.74b	1.03a	9.32a	9.33a	8.43b
标准差 ^④	3.3	3.79	4.96	0.2	0.17	0.2	1.4	2.5	2.08
偏度 ^⑤	1.25	0.91	0.99	1.06	0.64	1.16	1.9	1.37	0.83
峰度 ^⑥	1.94	1.02	0.61	1.5	1.08	2.64	6.1	4.24	1.64
变异系数 ^⑦ /%	37.35	32.05	33.09	37.22	36.64	23.5	19.71	31.36	15.03
分布类型 ^⑧	对数正态 ^⑨	对数正态 ^⑨	对数正态 ^⑨	对数正态 ^⑨	Box-cox 变换分布 ^⑩	Box-cox 变换分布 ^⑩	Box-cox 变换分布 ^⑩	Box-cox 变换分布 ^⑩	Box-cox 变换分布 ^⑩

注: 同行均值后不同字母表示同一土壤养分指标不同年份间存在显著差异 ($P < 0.05$)。Note: Different letters after the mean value in the same line indicate significant differences in the same soil nutrient indexes among different years ($P < 0.05$). ①Min, ②Max, ③Average, ④SD, ⑤Skewness, ⑥Kurtosis, ⑦CV, ⑧Distribution type, ⑨Log-Normal, ⑩Box-Cox transformation.

2.2 耕地土壤有机质和全氮时空变异特征

2.2.1 不同时期土壤有机质和全氮的空间结构特征

对 1983 年、2008 年和 2019 年三个时期耕地 SOM 和 TN 数据进行半方差函数模型的拟合, 对比分析各个模型的决定系数与残差, 各指标半方差函数模型得出的相应参数见表 2。由此可见, 1983 年 SOM 和 TN 的最优拟合模型为高斯模型, 2008 年的 SOM 和 TN 及 2019 年的 TN 的最优拟合模型为指数模型, 而 2019 年 SOM 的最优拟合模型为球状模型。不同的模型参数表明不同模型拟合的效果且均能很好地反映各个指标的空间分布特征。

块金值表示试验误差和小于取样尺度的变异, 块基比则可用来表示空间自相关性^[1]。一般地, 块基比小于 25% 说明其受到结构性因素 (自然因素) 影响程度较大; 块基比在 25%~75% 之间说明其受到结构性因素和非结构性因素 (随机因素) 的共同影响; 块基比大于 75% 说明其受到非结构性因素的影响程度较大^[1]。由表 2 可知, 1983 年、2008 年和 2019 年 SOM 的变程分别为 80 020、3 300 和 50 680 m, 呈先减小后增大的趋势, 其块基比由 1983 年的 22.0% 增至 2008 年的 47.7% 和 2019 年的 49.8%, 说明 1983 年 SOM 主要受到结构性因素的影响, 表现为强烈的空间自相关性, 2008 年和 2019 年则受到结构性因素和非结构性因素共同作用, 且受到非结构性因素的影响逐渐增强, 人为活动干扰对其影响越来越大。这与曹婧等^[16]的研究结果相一致, 其研究发现 2017 陕西省的耕地 SOM 也表现为中等强度的空间自相关性, 其 SOM 空间分布受随机性因素和结构性因素的共同作用。1983 年土壤 TN 的块基比为 14.9%, 呈现强烈的空间自相关性, 2008 年和 2019 年分别升至 49.7% 和 38.5%, 其空间自相关性降低, 受到结构性因素和非结构性因素共同作用, 这与赵业婷^[17]发现的土壤养分的块金系数均在 25%~75% 之间的研究结果相一致。

表 2 1983 年、2008 年和 2019 年天镇县土壤有机质和全氮变异函数理论模型及其参数

Table 2 Theoretical models of soil organic matter and total nitrogen variation functions and their parameters in Tianzhen County in 1983, 2008 and 2019

指标 Index	年份 Year	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块基比 Nugget/Sill/%	变程 Range/m	残差 RSS	决定系数 R^2
有机质 Soil organic matter	1983	高斯 Gaussian	0.052 6	0.239 2	22.0	80 020	8.728×10^{-4}	0.965
	2008	指数 Exponential	0.035 3	0.074 0	47.7	3 300	2.212×10^{-5}	0.810
	2019	球状 Spherical	0.116 6	0.234 2	49.8	50 680	3.338×10^{-3}	0.754
全氮 Total nitrogen	1983	高斯 Gaussian	0.004 9	0.032 6	14.9	51 788	1.008×10^{-4}	0.915
	2008	指数 Exponential	0.007 2	0.014 4	49.7	105 900	1.090×10^{-5}	0.707
	2019	指数 Exponential	0.013 4	0.034 9	38.5	7 950	7.206×10^{-5}	0.495

2.2.2 不同时期耕地土壤有机质和全氮的时空分布特征 根据半方差函数模型,利用 ArcGIS 10.7 的普通克里格插值法对整个研究区域进行空间插值。结合全国第二次土壤普查养分分级标准,通过 ArcGIS 10.7 对其进行分析、评价及面积占比统计,分析天镇县 1983—2019 年 SOM 和 TN 的时空演变特征。

2019 年天镇县 SOM 含量(图 2)、等级占比(表 3)较 1983 年发生明显变化。1983 年 SOM 含量处于偏低水平,大部分区域 SOM 含量在 $6\sim 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,处于五级水平的占比达 78.6%,多分布于中部乡镇,而 SOM 含量较高的地区为北部的新平镇和东部的南高崖乡,其 SOM 含量大部分在 $10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于四级水平,占比为 19.8%。2008 年天镇县大部分区域 SOM 含量呈现南低北高的分布格局,以含量在 $10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间为主,占比为 88.1%,低值区分布在中部偏南地区,主要为赵家沟乡、南河堡乡南部以及贾家屯乡西部;2019 年较 2008 年 SOM 含量整体有明显增加,两个时期空间分布特征相似,大部分区域 SOM 含量仍在 $10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,占比达 90.2%;SOM 含量较高的地区在北部新平镇和东部南高崖乡的部分区域,其 SOM 含量处于 $20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,占比达 4.5%。总体而言,天镇县 SOM 含量虽逐年上升,但平均仍处于 $10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于四级水平,整体偏低,需积极育土培肥。

图 2、表 3 结果表明,1983 年土壤 TN 含量呈现西部低、东部高的分布格局,大部分区域土壤 TN 含量在 $0.5\sim 0.75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,处于五级水平,占比达 53.7%;TN 含量较低的区域主要分布在西南部,其含量大多小于 $0.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于六级水平,占比为 38.3%。TN 含量较高的地区为北部的遼家湾镇和东部的南高崖乡的部分地区,TN 含量处于四级水平,其含量多在 $0.75\sim 1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中南高崖乡东部 TN 含量高达 $1.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。2008 年土壤 TN 含量有明显增加,主要以 TN 含量在 $0.5\sim 0.75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间的土壤为主,占比为 61.6%,而 TN 含量在 $0.75\sim 1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤面积占比增至 38.3%,其主要分布在中北部和东部。2019 年土壤 TN 含量较 2008 年显著增加,其呈现由南向北逐渐增加的趋势,其中北部的 TN 含量增长较大,其 TN 含量为 $1.50\sim 2.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (三级水平)的土壤面积占比最高为 44.0%。1983 年 TN 含量多为 $0.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,而 2019 年土壤 TN 含量均在 $1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,增加幅度最高可达 $1.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

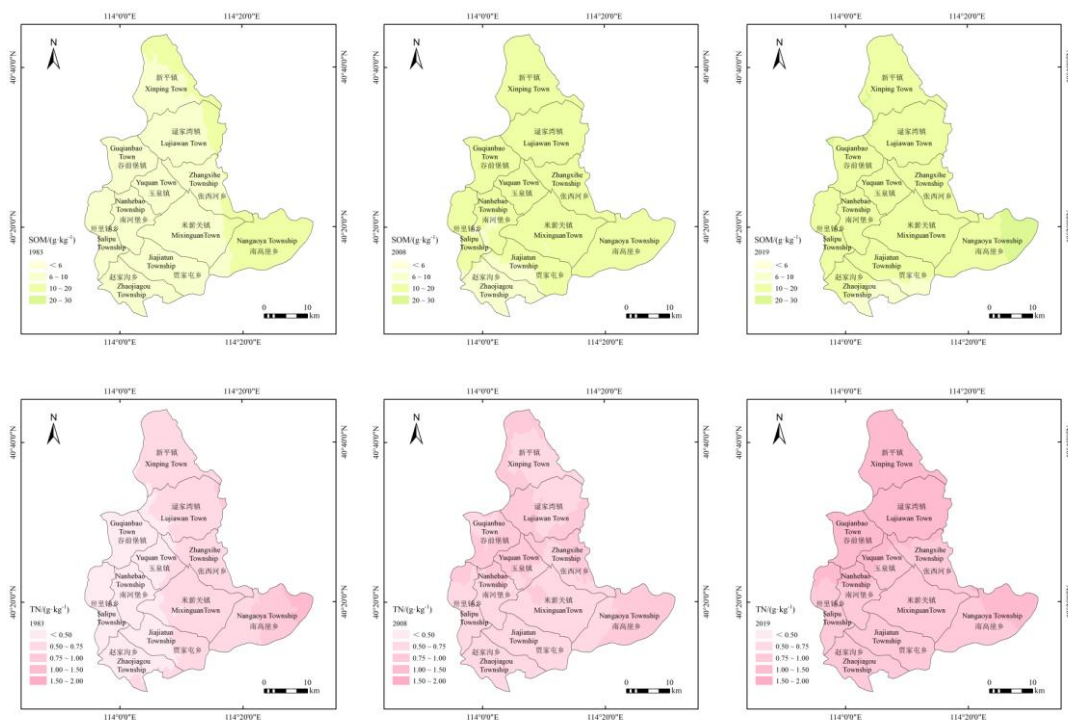


图 2 1983 年、2008 年和 2019 年天镇县土壤有机质 (SOM, 上) 及全氮 (TN, 下) 的空间分布图
Fig. 2 Spatial distribution of soil organic matter (SOM, Top) and total nitrogen (TN, Bottom) in Tianzhen County in 1983, 2008 and 2019

表 3 1983 年、2008 年和 2019 年土壤有机质和全氮含量面积比例

Table 3 Area ratios of soil organic matter and total nitrogen content in 1983, 2008 and 2019

指标 Index	年份 Year	面积占比 Area ratios/%					
		一级 First grade	二级 Second grade	三级 Third grade	四级 Fourth grade	五级 Fifth grade	六级 Sixth grade
有机质 Soil organic matter	1983	0.0	0.0	0.0	19.8	78.6	1.6
	2008	0.0	0.0	0.0	88.1	11.9	0.0
	2019	0.0	0.0	4.5	90.2	5.3	0.0
全氮 Total nitrogen	1983	0.0	0.0	1.6	6.4	53.7	38.3
	2008	0.0	0.0	0.1	38.3	61.6	0.0
	2019	0.0	0.0	44.0	56.0	0.0	0.0

注: 一级到六级有机质含量分别为: $<6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $6\sim 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $30\sim 40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $>40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 一级到六级全氮含量分别为: $<0.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.50\sim 0.75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.75\sim 1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.00\sim 1.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.50\sim 2.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $>2.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Note: The organic matter contents of Grade One to Grade Six are $<6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $6\sim 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $10\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $20\sim 30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $30\sim 40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $>40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The total nitrogen contents of Grade One to Grade Six are $<0.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.50\sim 0.75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.75\sim 1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1.00\sim 1.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1.50\sim 2.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $>2.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively.

2.2.3 不同时期耕地土壤有机质和全氮的变化率 1983—2008 年大部分乡镇 SOM 含量年均变化率为正值, 年均增加 0~5% 的土壤面积占比达 89.0% (图 3)。其中新平镇东北部、米薪关镇和南高崖乡的交汇处 SOM 含量年均变化率为负值, 其土壤面积占比为 2.3% (表 4); 而在 2008—2019 年期间, 南部的贾家屯乡和赵家沟乡的部分区域的 SOM 含量年均变化率为负值; 而其他乡镇大部分区域 SOM 含量年均变化率均为正值, 县域北部的新平镇和遼家湾镇部分区域的 SOM 年均增长率最大, 达 5%~10%, 其土壤面积占比为 1.8%。整体而言, 1983—2008 年 SOM 含量的年均变化率较大。

由图 3 可知, TN 含量年均变化率和 SOM 含量年均变化率的变化趋势相似, 在 1983—2008 年新平镇东北部、米薪关镇和南高崖乡的交汇处及南高崖乡东部 TN 含量呈现下降趋势, 其下降的土壤面积占比约为 4.9% (表 4), 其他乡镇大部分地区均呈上升趋势, 其中 TN 含量年均增加 0~5% 的土壤面积占比为 91.3%。而在 2008—2019 年期间, 各乡镇的 TN 含量年均变化率均表现出增加的趋势, 尤其是北部的新平镇和逯家湾镇, 其大部分区域的 TN 含量年均变化率为 5%~10%, 土壤面积占比为 9.8%。总体而言, 近 36 年来天镇县土壤 TN 含量西北地区增速快, 东南地区增速慢。

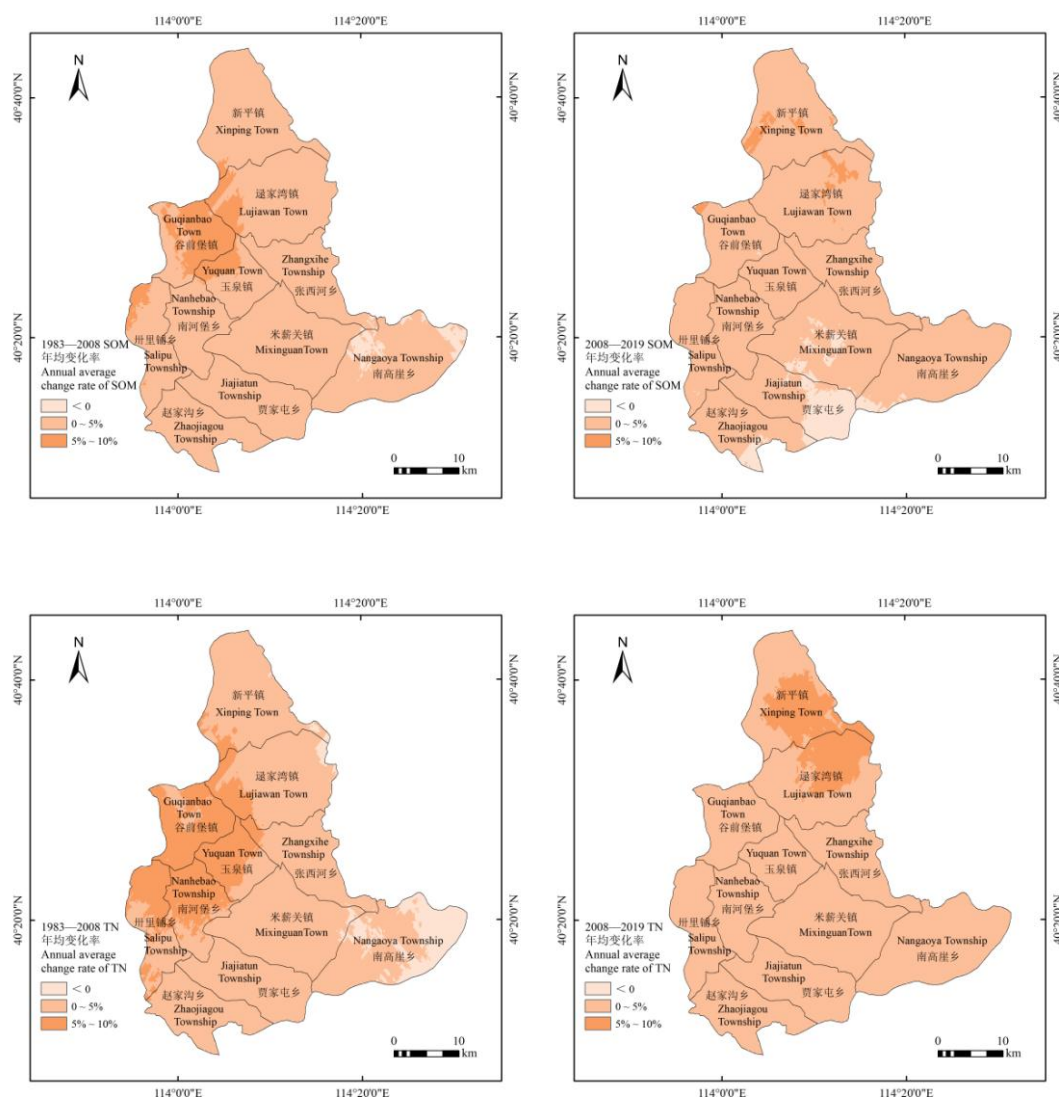


图 3 土壤有机质含量 (上) 和全氮含量 (下) 年均变化率

Fig.3 Annual average rate of change in soil organic matter (Top) and total nitrogen content (Bottom)

表 4 土壤有机质和全氮年均变化率面积比例

Table 4 Area ratios of annual average change rates of soil organic matter and total nitrogen

指标 Index	时间段 Period	年均变化率面积占比		
		Ratio of the area with an annual average rate of change/%		
		减少 Reduce	增加 0~5% Increase of 0-5%	增加 5%~10% Increase of 5%-10%
有机质 Soil organic matter	1983—2008	2.3	89.0	8.7
	2008—2019	6.2	92.0	1.8
全氮 Total nitrogen	1983—2008	4.9	91.3	3.8
	2008—2019	0.0	90.2	9.8

3 讨论

3.1 影响土壤有机质含量和全氮变化的主要因素

耕地是人类赖以生存的物质基础，而 SOM 和 TN 作为耕地质量的核心关键，其含量的高低是衡量耕地质量及肥力好坏的标准^[7]。本研究发现，近 30 年来，随着农业生产水平的提高和精耕细作农业种植模式的推广，天镇县耕地土壤 SOM 和 TN 含量从 1983 年到 2019 年间有了明显的提升（表 1）。半方差分析结果显示，SOM 和 TN 受结构性因素和随机性因素共同影响（表 2）。

3.1.1 自然因素 1983—2019 年天镇县各乡镇大部分 SOM 和 TN 含量均出现不同程度的上升趋势，但仍处于中等偏低水平，大多处于四级水平（图 2 和表 3）。相关分析表明，天镇县 1983 年的 SOM 与 TN 含量呈极显著的正线性相关（ $r=0.941$, $P<0.001$ ）。而 2008 年和 2019 年的 SOM 与 TN 含量也呈极显著的正线性相关（ $r=0.633$, $P<0.001$; $r=0.619$, $P<0.001$ ），但其相关系数较 1983 年相对较小，因此 SOM 和 TN 的变化状况表现出一定的相似性，这与前人研究的结果^[18-19]较为一致。

不同地形地貌的光热及水分条件不同，会影响到 SOM 的矿化和腐殖化过程，从而影响 SOM 和 TN 含量^[20]。SOM 的积累与分解直接影响着氮素在土壤中的贮存和转化，对土壤中的氮素含量起着主导作用。天镇县高程在 900~2 000 m 左右，本研究按照高程范围将其划分为四组（表 5），其中在高程 1 000~1 200 m 和大于 1 400 m 范围内的 SOM 和 TN 含量变化较大。研究发现，三个时期 1 000~1 200 m 高程范围下中等水平的 SOM 含量（10~20 g·kg⁻¹）和 TN 含量（0.75~1.00 g·kg⁻¹）的占比逐渐增加，SOM 含量占比由 1983 年的 38.7% 增至 2019 年的 74.1%，TN 含量占比由 1983 年的 25.0% 增至 70.6%。这是由于该高程范围下，地势较为平坦，条件便利，农业比较发达，农民的投入和管理水平较高，使得 SOM 和 TN 含量较高。而在三个时期大于 1 400 m 高程范围下 SOM 含量和 TN 含量的占比逐渐降低，SOM 含量占比由 1983 年的 35.5% 降至 2019 年的 7.4%，TN 含量占比由 1983 年的 50.0% 降至 8.8%。造成该现象的原因可能是该高程下大多是丘陵和坡耕地，农民的投入较低，SOM 和 TN 含量降低。

有研究表明，不同的土壤类型，其成土过程、矿物组成和发育程度不同，这可能会影响土壤 TN 和 SOM 含量^[19, 21-23]。将采样点与土壤图进行叠加分析（表 6），天镇县主要的土壤类型包括栗钙土和草甸土。草甸土土层较厚，有机物质生长量较大，分解缓慢，十分有利于 SOM 的积累。而栗钙土主要成土母质为花岗片麻岩砂页岩、石灰岩及玄武岩等风化物，多为残积母质或坡积物，且气候干燥少雨。天镇县作物为一年一熟，受降水、母质条件影响，栗钙土钙积效果明显，养分中等，SOM 的合成速度和合成量少，而矿化分解的速度很快，导致 SOM 积累较少^[22-23]。但本研究发现天镇县栗钙土和草甸土的 SOM 含量和 TN 含量的差异并不显著（表 6），这与大部分

研究的结果均不相同,可能的原因是研究区域的土壤质地不同,其通过影响土壤养分转化及有效性影响 TN 和 SOM 的含量^[24]。天镇县全县轻壤和中壤的面积最大,占全县耕地总面积的 86.67%。据统计,天镇县 65%的草甸土质地为轻壤,其物理性砂粒大于 50%,因此通透性好,土壤中的有机碳与氮素易被矿化,积累较少^[25],且全县的草甸土多为盐化草甸土,其 SOM 和 TN 含量本身较低;而栗钙土质地多为中壤和重壤,土壤长期处于嫌气状态,更利于 SOM 和氮素的积累与储存。土壤类型与质地相结合,以及其他因素的综合作用下,整体上栗钙土和草甸土 SOM 及 TN 含量的差异不显著。

表 5 不同年份和高程土壤有机质和全氮含量分级占比

Table 5 Graded proportion of organic matter and soil total nitrogen content in different years and altitudes/%

年份 Year	高程 Elevation/m	土壤有机质 Soil organic matter				全氮 Total nitrogen			
		<6 g·kg ⁻¹	6~10 g·kg ⁻¹	10~20 g·kg ⁻¹	20~30 g·kg ⁻¹	<0.5 g·kg ⁻¹	0.5~0.75 g·kg ⁻¹	0.75~1.00 g·kg ⁻¹	1.00~1.50 g·kg ⁻¹
1983	< 1 000	18.8	15.3	9.7	0.0	16.3	14.0	0.0	16.7
	1 000~1 200	75.0	50.9	38.7	0.0	69.8	42.0	25.0	16.7
	1 200~1 400	6.3	20.3	16.1	0.0	11.6	20.0	25.0	16.7
	> 1 400	0.0	13.6	35.5	100.0	2.3	24.0	50.0	50.0
2008	< 1 000	8.3	3.8	5.1	5.9	0.0	3.5	7.8	3.2
	1 000~1 200	75.0	42.9	53.2	47.1	47.4	51.7	51.6	41.9
	1 200~1 400	0.0	33.3	18.1	17.7	21.1	24.4	18.8	22.6
	> 1 400	16.7	20.0	23.6	29.4	31.6	20.4	21.9	32.3
2019	< 1 000	0.0	11.1	11.1	27.3	0.0	0.0	5.9	20.5
	1 000~1 200	0.0	44.4	74.1	72.7	0.0	0.0	70.6	71.8
	1 200~1 400	0.0	44.4	7.4	0.0	0.0	100.0	14.7	5.1
	> 1 400	0.0	0.0	7.4	0.0	0.0	0.0	8.8	2.6

表 6 不同年份不同土壤类型下土壤有机质和全氮的变化特征

Table 6 Variation characteristics of soil organic matter and total nitrogen in different years and different soil types

年份 Year	土类 Soil catalog	样点数 Samples	土壤有机质 Soil organic matter				全氮 Total nitrogen			
			均值 Mean/ (g·kg ⁻¹)	标准差 SD	最小值 Min/ (g·kg ⁻¹)	最大值 Max/ (g·kg ⁻¹)	均值 Mean/ (g·kg ⁻¹)	标准差 SD	最小值 Min/ (g·kg ⁻¹)	最大值 Max/ (g·kg ⁻¹)
1983	栗钙土 ^①	73	9.33a	3.45	2.80	20.00	0.60a	0.21	0.16	1.20
	草甸土 ^②	21	7.40b	2.02	2.90	11.20	0.43b	0.13	0.21	0.66
2008	栗钙土 ^①	286	11.87a	3.79	3.30	25.20	0.75a	0.17	0.28	1.37
	草甸土 ^②	43	11.91a	3.52	5.60	20.00	0.76a	0.17	0.45	1.21
2019	栗钙土 ^①	106	14.28a	4.69	7.65	27.33	1.00a	0.19	0.66	1.52
	草甸土 ^②	20	16.28a	5.78	9.88	29.95	1.06a	0.30	0.83	1.86

注:小写字母表示不同土类在同一年份下的差异显著($P < 0.05$)。Note: Lowercase letters indicate significant differences between different soil classes in the same year ($P < 0.05$). ①Chestnut soil, ②Meadow soil.

3.1.2 人为因素 施肥状况和田间管理等人为活动也是影响 SOM 和 TN 时空演变特征的重要因素。20 世纪 70 年代末开始,农民实施家庭联产承包责任制,化肥工业兴起,农户对耕地的化肥投入日益增多,粮食产量逐步提高,输入土壤的作物残茬和根系数量增多,因此 SOM 含量得以提升^[16]。20 世纪 90 年代后,工业化迅速发展、国家重视耕地保护以及农户加大化肥投入等均为 SOM

和 TN 含量的增加提供了契机^[10]。此外,增加氮肥投入量可增加作物的生物量,增加 SOM,从而间接提高了土壤 TN 含量^[26]。不同种植制度下的土壤氮素含量也有所差异,不同作物对氮素的需求不同,导致其氮素积累量不同^[27]。不同作物的根系分泌物会导致根际微生物种类上的差异^[28-29],这也会影响土壤氮素循环和转化^[30]。相较于 1984 年化肥施用总量 6 710 t (折纯量),2019 年化肥施用量总量达 14 820 t,施肥量大幅度提升,作物生物量提高,残留于土壤中根系量和还田秸秆量增加,从而使得 SOM 和 TN 含量也大幅上升^[31]。本研究搜集统计了天镇县近二十年主要作物玉米的农业生产施肥和产量情况,发现在 2008 年后测土配方施肥技术得到有效普及,农用化肥施用量有所提高,由 2008 年的 8 863 t 增至 2018 年的 9 608 t,但在施肥结构上,越来越注重养分均衡,重视配方施肥。虽然农民的氮肥投入由 2008 年的 6 074 t 降至 2018 年的 5 255 t,复合肥投入由 2008 年的 682 t 增至 2018 年的 1 739 t,但玉米产量在不断上升,由 2008 年的 100 171 t 增至 2018 年的 146 487 t,因此秸秆总量也在逐年增长,使得大量的有机物质进入土壤,还田量大幅提升,从而促进 SOM 和 TN 的积累^[32]。2009 年山西省发布了关于推荐山西省农业主导品种和主推技术的通知,大力推进农作物秸秆综合利用的实施,每年收获季节政府也会严格查处焚烧秸秆现象,上述措施均进一步促进了秸秆还田的推行。研究^[33]表明秸秆还田主要是通过影响腐殖质含量来调节 SOM,丰富的微生物活动使得秸秆中有机态养分加速分解释放,优化有机碳结构并提高稳定性,从而增加土壤的有机碳储量。

3.2 土壤碳氮变化的环境意义

土壤 C/N 常被用来衡量土壤的碳氮营养平衡状况,可作为土壤质量的敏感指标^[7],较单独的土壤碳氮指标,能更全面阐述碳氮的变化特点。天镇县 2008 年 SOM 含量为 1983 年的 1.34 倍, TN 含量为 1983 年的 1.35 倍;其土壤 C/N 无明显变化,但变异系数升高。2019 年 SOM 含量为 2008 年的 1.27 倍, TN 含量为 2008 年的 1.39 倍,其土壤 C/N 由 9.33 降至 8.43,变异系数显著降低,这与川中丘陵区^[34]的结果不同,可能的原因是川中丘陵区人口密集,土地垦殖系数提高,化学氮肥大量施用,逐渐改变了土壤中的碳氮比例。因此,需加强不同区域之间土壤碳氮比的空间变异及影响因素探究,以便更加深入和精确估测土壤碳氮储量^[35]。

土壤 C/N 也是衡量土壤肥力的最重要指标之一。C/N 的增加在一定程度上能够抑制微生物分解碳和氮的能力,并且减缓土壤碳和氮的矿化速度^[36],从而达到增加土壤中碳和氮含量的效果。保持合理的碳氮含量和土壤 C/N,是提高土壤固碳、固氮能力的重要手段^[7]。在农业生产中,一是要合理地施用氮肥,提高氮肥利用率。二是增施农家肥和绿肥,鼓励更多地施用有机肥,改善土壤理化性质和碳氮含量。三是推广秸秆还田技术,提高粮食产量并实现农业的可持续发展。

4 结论

天镇县 1983—2019 年 SOM 和 TN 含量整体呈现上升趋势,土壤碳氮比由 9.33 降至 8.43,变异系数显著降低,其碳氮的相关系数下降,需要进行适当调控。SOM 和 TN 时空演变格局由主要受结构性因素的影响转变为受结构性和随机性因素影响。1983 年 SOM 和 TN 主要受到土壤类型等结构因素的影响,2019 年主要受到施肥措施和秸秆还田等的影响。时空变化方面,大部分区域的 SOM 和 TN 含量呈增加趋势,1983—2008 年县域西北部的 SOM 和 TN 增幅最为明显,2008—2019 年县域北部的 SOM 和 TN 含量增加较多。

参考文献 (References)

- [1] 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. [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.]
- [2] Huang B, Sun W X, Zhao Y, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices[J]. *Geoderma*, 2007, 139(3/4): 336-345.
- [3] Gray L C, Morant P. Reconciling indigenous knowledge with scientific assessment of soil fertility changes in southwestern Burkina Faso[J]. *Geoderma*, 2003, 111(3): 425-437.
- [4] Chen H, Cao C F, Zhang C L, et al. Principal component-cluster analysis of effects of long-term fertilization on fertility of lime concretion black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 609-617.[陈欢, 曹承富, 张存岭, 等. 基于主成分-聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 609-617.]
- [5] Li P, Shi K, Wang Y, et al. Soil quality assessment of wheat-maize cropping system with different productivities in China: Establishing a minimum data set[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 190: 31-40.
- [6] Yang F, Xu Y, Cui Y, et al. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1047-1056. [杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1047-1056.]
- [7] Xiong X, Xiong Q H, Guo X, et al. Spatial variation characteristics of total nitrogen, organic carbon and ratio of carbon to nitrogen of cultivated land in typical hilly areas in South China and its influencing factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1656-1668.[熊杏, 熊清华, 郭熙, 等. 南方典型丘陵区耕地土壤全氮、有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1656-1668.]
- [8] Guo X, Jiang Y F. Spatial characteristics of ecological stoichiometry and their driving factors in farmland soils in Poyang Lake Plain, Southeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 263-274.
- [9] Liu J L, Jia K, Liao W H, et al. Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang Mountain during the period of 1978—2008[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1325-1335.[刘建玲, 贾可, 廖文华, 等. 太行山山麓平原 30 年间土壤养分与供肥能力变化[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1325-1335.]
- [10] Liao Y B, Wen L Y, Kong X B, et al. Spatio-temporal variability and influencing factors of soil organic matter in cultivated land of Daxing District in recent 40 years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(1): 40-49. [廖宇波, 温良友, 孔祥斌, 等. 近 40 年大兴区耕地土壤有机质时空变异特征及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2020, 51(1): 40-49.]
- [11] Sun X B, Zhang Q P, Kong X B, et al. Spatiotemporal characteristics of cultivated soil fertility in the intensive agricultural region of North China: A case study of Quzhou County in Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(12): 1857-1869.[孙晓兵, 张青璞, 孔祥斌, 等. 华北集约化农区耕地土壤肥力时空演变特征——以河北省曲周县为例[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(12): 1857-1869.]
- [12] Xiang S P, Xiang D M, Tian F, et al. Temporal and spatial variability of soil total nitrogen and organic matter in tobacco-planting area of Xiangxi, Hunan[J]. *Soils*, 2020, 52(2): 372-377.[向世鹏, 向德明, 田峰, 等. 湘西植烟土壤有机质和全氮时空变异特征研究[J]. *土壤*, 2020, 52(2): 372-377.]
- [13] Wang Q B, Yu W X, Wang N Y, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon, nitrogen and carbon-nitrogen ratio in main drylands of Jilin Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(23): 40-42.[王秋彬, 于卫昕, 王年一, 等. 吉林省主要旱田土壤有机碳·氮和碳氮比的空间分布特征[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(23): 40-42.]
- [14] Liu P W, Gao P, Liu X H, et al. Spatial distribution and influential factors of soil carbon and nitrogen in Dagangshan Watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(2): 73-79.[刘潘伟, 高鹏, 刘晓华, 等. 大岗山流域土壤碳氮要素空间分布特征及影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(2): 73-79.]
- [15] Zhang Z Q, Mao P, Yu D S, et al. Characteristics of soil pH variation in typical red soil region of South China in the past 25 years—A case study of Yujiang County, Jiangxi Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6): 1545-1553. [张忠启, 茆彭, 于东升, 等. 近 25 年来典型红壤区土壤 pH 变化特征——以江西省余江县为例[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1545-1553.]
- [16] 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. [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.]

- [17] Zhao Y T. Spatial characteristics and changes of soil nutrients in cultivated land of Guanzhong region in Shaanxi Province based on GIS[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015. [赵业婷. 基于 GIS 的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.]
- [18] Zhang C H, Wang Z M, Ju W M, et al. Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain maize belt[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5): 1407-1414. [张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. *环境科学*, 2011, 32(5): 1407-1414.]
- [19] Jiang Y F, Guo X, Sun K, et al. Spatial variability of C-to-N ratio of farmland soil in Jiangxi Province[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(9): 3840-3850. [江叶枫, 郭熙, 孙凯, 等. 江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2017, 38(9): 3840-3850.]
- [20] Li L H, Gao E H, Meng M, et al. The distribution of soil organic carbon as affected by landforms in a small watershed of gully region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 179-187. [李林海, 郜二虎, 梦梦, 等. 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 179-187.]
- [21] 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. [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.]
- [22] Chong J. Spatial distribution of cultivated soil nutrients in Shanxi Province and its correlation with landform Hekou soil[D]. Taiyuan, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2015. [重洁. 山西省耕地土壤养分空间分布及其与地貌禾口土壤的相关性研究[D]. 山西太原: 山西农业大学, 2015.]
- [23] Shen R Y. Spatial variability analysis of soil organic matter content in different types of soil in Datong City[D]. Taiyuan, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2019. [申若禹. 大同市不同类型土壤有机质含量空间变异性分析[D]. 山西太原: 山西农业大学, 2019.]
- [24] Ge N N, Shi Y, Yang X L, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1626-1632. [葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1626-1632.]
- [25] Hu S J, Deng O P, Zhang S R, et al. Spatial-temporal variability of soil organic carbon and total nitrogen in paddy soils in Sichuan Basin[J]. *Soils*, 2016, 48(2): 401-408. [胡嗣佳, 邓欧平, 张世榕, 等. 四川盆地水稻土有机碳与全氮的时空变异及影响因素研究[J]. *土壤*, 2016, 48(2): 401-408.]
- [26] Wang W, Lai D Y F, Wang C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 152(9): 8-16.
- [27] Quan S M, Wang X K, Hu F. Changes of soil total nitrogen content in farmland of Jiangsu Province and its influencing factors[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2018, 41(6): 1078-1084. [全思懋, 王绪奎, 胡锋. 江苏省农田土壤全氮含量变化及其影响因子[J]. *南京农业大学学报*, 2018, 41(6): 1078-1084.]
- [28] Yang Z X, Tang L, Zheng Y, et al. Effects of different wheat cultivars intercropped with faba bean on faba bean Fusarium wilt, root exudates and rhizosphere microbial community functional diversity[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 570-579. [杨智仙, 汤利, 郑毅, 等. 不同品种小麦与蚕豆间作对蚕豆枯萎病发生、根系分泌物和根际微生物群落功能多样性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 570-579.]
- [29] Zhong Y Q W, Yan W M, Shangguan Z P. Impact of long-term N additions upon coupling between soil microbial community structure and activity, and nutrient-use efficiencies[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 91: 151-159.
- [30] Hallin S, Jones C M, Schloter M, et al. Relationship between N-cycling communities and ecosystem functioning in a 50-year-old fertilization experiment[J]. *The ISME Journal*, 2009, 3(5): 597-605.
- [31] Dai Z J, Zhao X, Li D C, et al. Spatio-temporal variation of soil total nitrogen in Huangshui river basin and its affecting factors in the past 30 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 338-350. [代子俊, 赵霞, 李德成, 等. 近 30 年湟水流域土壤全氮时空变异及影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 338-350.]
- [32] Gong H R, Li J, Ma J H, et al. Effects of straw incorporation combined with inorganic-organic fertilization on soil water and

- nitrogen changes and microbial community structure in winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 2203-2214.[公华锐, 李静, 马军花, 等. 秸秆还田配施有机无机肥料对冬小麦土壤水氮变化及其微生物群落和活性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2203-2214.]
- [33] Cong P. Fertilization effect and mechanism of subsoil under high dosage straw returning in black soil of Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. [丛萍. 秸秆高量还田下东北黑土亚耕层的培肥效应与机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.]
- [34] Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatio-temporal variations of soil organic carbon and total nitrogen and driving factors in purple soil hilly area of Mid-Sichuan basin in the past 30 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 582-593. [罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 582-593.]
- [35] Jiang Y F, Zhong S, Li J, et al. Spatial and temporal variability of soil C-to-N ratio of Yugan County and its influencing factors in the past 30 years[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1386-1395. [江叶枫, 钟珊, 李婕, 等. 近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2018, 39(3): 1386-1395.]
- [36] Xie G X, Lou X P, Ruan Y F, et al. Characteristic and influencing factors of C /N ratio of farmland soil in Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(2): 51-55.[谢国雄, 楼旭平, 阮弋飞, 等. 浙江省农田土壤碳氮比特征及影响因素分析[J]. *江西农业学报*, 2020, 32(2): 51-55.]

(责任编辑 : 陈荣府)