

解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 黄土高原东部潇河流域农田土壤有机质时空变异及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 96-104.

XIE Wen-yan, ZHOU Huai-ping, YANG Zhen-xing, et al. The spatial-temporal variation of soil organic matter and its influencing factors in Xiaohe River basin in eastern Loess Plateau, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1): 96-104.

# 黄土高原东部潇河流域农田土壤有机质 时空变异及影响因素

解文艳<sup>1</sup>, 周怀平<sup>1</sup>, 杨振兴<sup>1</sup>, 冯悦晨<sup>1</sup>, 白雪<sup>2</sup>, 杜艳玲<sup>2</sup>

(1. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030031; 2. 山西大学生物工程学院, 太原 030006)

**摘要:**为揭示土壤有机质时空变化规律及其影响因素,通过收集黄土高原东部潇河流域1982年第二次土壤普查数据和2017年不同时期耕层土壤有机质含量的实测资料,应用地统计学方法对其进行分析。结果表明:从1982年至2017年,耕层土壤有机质均值由 $11.06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 升高至 $15.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,增幅为41.86%;近35年潇河流域农田耕层土壤有机质含量均呈增加趋势,空间分布呈现由中部向四周逐渐升高的趋势。从第二次土壤普查时期到2017年,耕层土壤有机质含量表现为从低级向高级逐渐累积的规律。其中,土壤有机质含量 $>20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $15\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土地面积从无增加到分别占流域总面积的0.74%和43.72%, $10\sim 15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土地面积减少幅度最大,为29.93%, $6\sim 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土地面积从13.82%减少到1.57%, $<6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土地从有到无。成土母质、地形变化、种植结构、施肥是影响土壤有机质时空分异的主要因素,人类对土壤养分干预作用表现出增强的趋势,应注意土壤培肥,实行分区管理,以保证整个农业流域的可持续发展。

**关键词:**耕层;土壤有机质;地统计学;时空变异;影响因素;潇河流域

中图分类号:S158

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)01-0096-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0195

## The spatial-temporal variation of soil organic matter and its influencing factors in Xiaohe River basin in eastern Loess Plateau, China

XIE Wen-yan<sup>1</sup>, ZHOU Huai-ping<sup>1</sup>, YANG Zhen-xing<sup>1</sup>, FENG Yue-chen<sup>1</sup>, BAI Xue<sup>2</sup>, DU Yan-ling<sup>2</sup>

(1. Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 2. College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** The objective of this study was to explore the spatial-temporal variability of soil organic matter (SOM) and its influencing factors. Based on the data of 168 sample points collected in 1982 from the Second Soil Survey and 213 soil sample points collected in 2017 of the Xiaohe River basin in the eastern Loess Plateau, the spatial and temporal variation of soil organic matter in the drainage basin in the last 35 years and the influencing factors were analyzed by statistical and geostatistics methods. The results showed that from 1982 to 2017, the mean value of soil organic matter in cultivated soil increased from  $11.06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  to  $15.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and the amplification reached 41.86%. In the recent 35 years, the organic matter in the farmland of the Xiaohe River basin had an increasing trend, and the spatial distribution increased gradually from the central part to the surrounding area. From the year of the second soil census to 2017, the organic matter content of the soil in the ploughed layer showed the rule of gradually accumulated from lower level to higher level. Among them, the land area of soil organic matter content  $>20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and  $15\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  increased from zero to 0.74% and 43.72% of the total area of the river basin re-

收稿日期:2018-07-24 录用日期:2018-09-21

作者简介:解文艳(1978—),女,山西曲沃人,副研究员,从事土壤水肥资源可持续利用及水土环境控制方面研究。E-mail: xwy6018060@163.com

基金项目:山西省农业科学院博士研究基金项目(YBSJJ1615);山西省重点研发计划(一般项目)(201703D221008-1);山西省重点研发计划(重点项目)(201703D211002-3, 201603D2110-5)

**Project supported:** Doctoral Research Fund Project, Shanxi Academy of Agricultural Sciences (YBSJJ1615); Key R&D Program (General) Projects of Shanxi Province (201703D221008-1); Key R&D Program (Major) Projects of Shanxi Province (201703D211002-3, 201603D2110-5)

spectively, the land area of  $10\sim 15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  decreased the most, and it reached 29.93%,  $6\sim 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  decreased from 13.82% to 1.57%, and  $<6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  decreased from something to nothing. Soil parent material, topography change, planting structure and fertilization are the main factors that affect the temporal and spatial differentiation of soil organic matter. Human beings show an increasing trend of soil nutrient intervention, and we should be paid attention to the regional management of soil fertilizer to ensure the sustainable development of the whole agricultural watershed.

**Keywords:** arable layer; soil organic matter; geostatistics; spatio-temporal variability; affected factor; Xiaohu River basin

土壤有机质(Soil organic matter, SOM)是土壤的重要组成部分,直接影响植物生长和产量,是土壤养分供应能力与肥力的重要指标之一,对土壤理化性质的改善和农业可持续发展等起着重要作用<sup>[1]</sup>。同时,土壤有机质也是陆地生态系统碳循环过程中非常重要的源与汇,是目前土壤学和环境学的研究热点之一<sup>[2-3]</sup>。

近年来随着地统计学和GIS技术的发展,地统计学在土壤学、生态学等领域应用越来越广泛,成为研究土壤属性空间变异的有效工具,对农业生产具有积极的指导作用。地貌类型、土壤类型、土地利用方式、耕作和培肥措施等自然因素和人为随机因素均可影响土壤有机质时空分布<sup>[4]</sup>。赵明松等<sup>[1,3]</sup>对江苏省土壤有机质时空变异特征及驱动力进行了研究;Huang等<sup>[5]</sup>、朱静等<sup>[6]</sup>对长江中下游典型地区不同土壤类型有机质和全氮的时空变异规律进行了详细研究,探讨了变异产生的自然和人为因素;赵业婷等<sup>[2]</sup>探索了渭河平原县域农田土壤有机质时空变化特征。由于土壤类型变化、农业活动等的复杂性导致土壤有机质的时空变异非常复杂,因此,今后对长时间序列有机质空间定量估测及其影响因素的研究仍具有理论和现实意义,其结果可为土壤固碳速率、潜力和土壤可持续利用性的评估提供重要的参考依据,是实施数字土壤技术和精准农业的必经之路。当前研究多停留在以行政区域或单一地类地块为单元的层面,容易忽略区域有机质形成和演变过程中自然要素的影响,一定程度上也制约了有机质研究的客观真实性。流域作为一种集社会经济和自然过程于一体的复合型系统,是基于自然因素形成的典型区域,以流域为单元进行有机质空间特征研究可以很好地揭示流域内社会经济和自然因素与有机质形成及其空间特征的内在关系<sup>[7]</sup>,小流域尺度土壤有机质和土壤养分含量的空间变异研究是土地持续利用的基础。

山西省潇河流域是黄土高原东部典型的农业生产区,是晋中平原与晋东丘陵接壤地带。区内平原、丘陵和山区皆有分布,以丘陵为主,其地貌类型、土壤类型、土地利用、种植结构等方面在黄土高原东部地

区具有一定代表性,本文以山西省潇河流域为研究对象,对2017年采集的土壤有机质含量数据与第二次土壤普查(1982年)相关数据进行比较,旨在揭示该流域1982—2017年土壤有机质时空变化规律,并分析其影响因素,为黄土高原东部耕地质量建设和碳储量的估算及其不确定性评价提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为山西省寿阳县、昔阳县、和顺县、榆次区构成的潇河流域(图1),地理位置介于 $112^{\circ}25'\sim 113^{\circ}40'\text{E}$ , $37^{\circ}27'\sim 38^{\circ}05'\text{N}$ 之间,流域总面积 $3720\text{ km}^2$ ,其中山区、丘陵区面积 $3090\text{ km}^2$ ,平川区面积 $630\text{ km}^2$ ,海拔 $730\sim 1822\text{ m}$ 。流域呈高原丘陵地貌,按其特点大体上可分为五类:石山区、土石山区、林区、黄土丘陵区、河谷阶地及平川区。该流域气候属大陆性半干旱气候,多年平均降水量为 $459.6\text{ mm}$ ,降水变率大,年内季节分布不均,主要集中在7—9月;多年的平均气温是 $10.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均每年 $120\sim 145\text{ d}$ 无霜期,多年平均蒸发量为 $2063\text{ mm}$ 。

根据第二次全国土壤普查资料,该流域共有8个土类,13个亚类,42个土属,180个土种,其中分布最广的农业土壤依次为淡褐土性土、浅色草甸土、淡褐土、褐土性土、山地褐土及草灌褐土;流域主要有4种成土母质,分别为冲积母质、沟淤积母质、黄土母质、人工堆垫母质。地表植被主要为大田农作物(玉米、杂粮)、蔬菜和水果等。

### 1.2 数据来源

本文分析数据包括两个时期的土壤表层(0~20 cm)有机质含量:第二次土壤普查(1982年)的168个样点土壤数据,收集自《寿阳土壤》<sup>[8]</sup>、《榆次土壤》<sup>[9]</sup>、《昔阳土壤》<sup>[10]</sup>及《和顺土壤》<sup>[11]</sup>;2017年的213个样点数据,由野外采样后分析所得。

### 1.3 样品采集及测定

第二次土壤普查资料样点位置主要依据其描述记录的大致地点信息以及景观信息,结合行政区划

图、地形地貌、土地利用、土壤类型分布等确定。

结合整个流域的地形图、土地利用状况分布图、第二次土壤普查的土壤类型分布图及其168个原点分布图及剖面记载表等资料,在考虑样点代表性和空间分布的均匀性等因素基础上,按网格法进行区域尺度下的样点设计,于2017年调查采集样点213个(图

2)。样品采集在上一年作物收获之后、当年作物播种前的春季进行。采样时均用GPS记录每个采样点的地理坐标、海拔、土地利用历史、植被、土壤类型、成土母质等信息。

采回土样在室温下自然风干,剔除植物残渣和石块,研磨过100目尼龙筛,然后装袋备用。土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法进行测定<sup>[12]</sup>。

#### 1.4 数据处理

利用ArcGIS 9.3进行普通Kriging插值,绘制两个时期潇河流域土壤有机质的空间分布图,两个时期的空间分布图叠加相减,获得两个时期土壤有机质变异分布图。利用SPSS 11.5软件对两个时期土壤有机质含量进行描述性统计和方差分析等<sup>[4]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 潇河流域土壤有机质含量统计特征

表1为潇河流域两期数据描述性统计情况。潇河流域1982年农田土壤有机质含量介于2.40~24.10 g·kg<sup>-1</sup>,平均值为(11.06±3.04)g·kg<sup>-1</sup>,处于全国第二次土壤普查耕层有机质分级标准的第3级,即10~15 g·

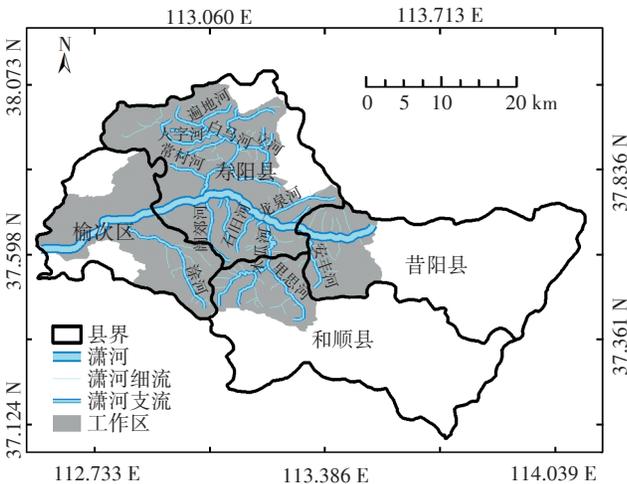


图1 潇河流域地理位置及水系图

Figure 1 Geographical position of Xiaohe River basin

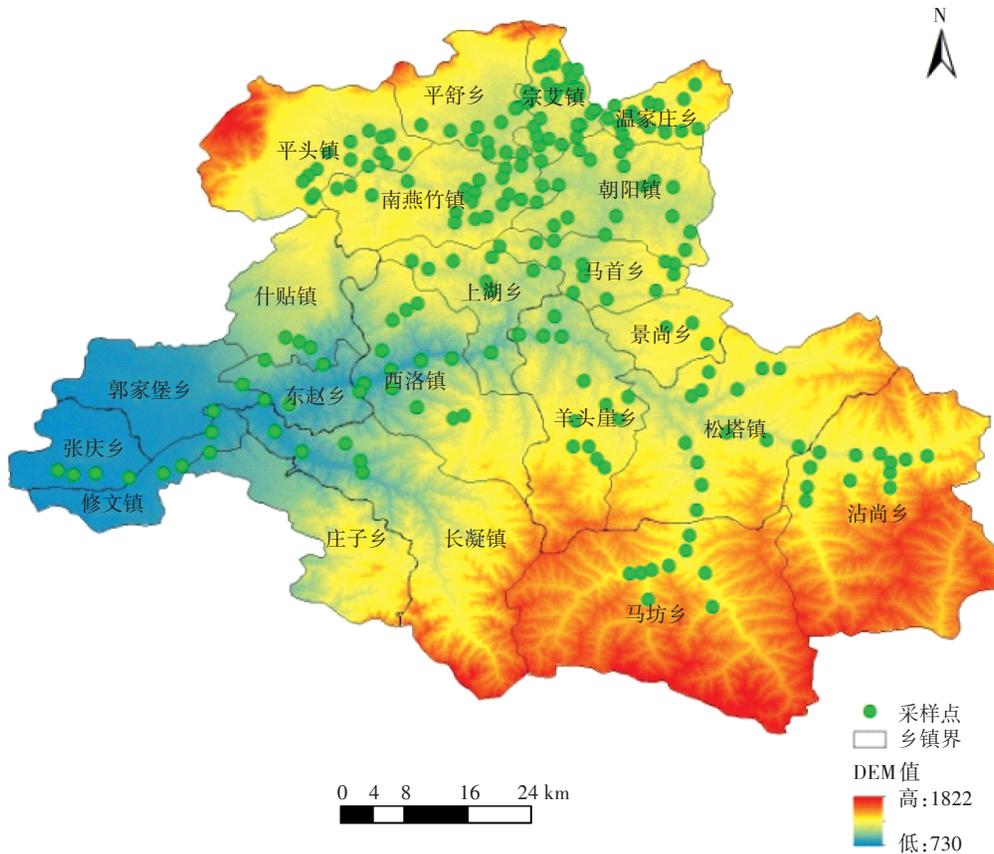


图2 潇河流域取样分布图

Figure 2 Sampling sites in Xiaohe River basin

表1 潇河流域土壤有机质含量统计

Table 1 Statistics of SOM contents in the Xiaohe River basin in 1982 and 2017

年份 Year	样本个数 Sample points	分布类型 Type of distribution	均值±标准差 Mean±SD/g·kg <sup>-1</sup>	最大值 Max/g·kg <sup>-1</sup>	最小值 Min/g·kg <sup>-1</sup>	变异系数 CV/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S
1982	168	正态	11.06±3.04	24.10	2.40	27.46	0.62	1.80	1.013
2017	213	对数正态	15.69±4.84	36.07	5.05	30.86	-0.21	0.96	0.631

kg<sup>-1</sup>,属中等水平;变异系数27.46%,揭示了有机质含量的离散程度属于中等变异强度。偏度和峰度值分别为0.62和1.80,K-S检验表明符合正态分布( $P>0.05$ ),满足地统计学分析的基本要求。

2017年土壤有机质数据经对数转换后符合正态分布。潇河流域2017年农田土壤有机质平均含量为(15.69±4.84)g·kg<sup>-1</sup>,处于全国第二次土壤普查耕层有机质分级标准的第2级,即15~20 g·kg<sup>-1</sup>,属中等偏上水平;农田土壤有机质最小值5.05 g·kg<sup>-1</sup>,最大值36.07 g·kg<sup>-1</sup>,极差较大;变异系数为30.86%,属中等变异程度。

土壤有机质是耕地地力最重要的性状之一,被认为是土壤质量和功能的核心,在农业生产中,土壤有机质是至关重要的决定因子<sup>[13]</sup>。35年来,潇河流域农田耕层土壤有机质含量呈整体上升趋势,潇河流域耕层土壤有机质平均含量较第二次土壤普查时期提高4.63 g·kg<sup>-1</sup>,增幅41.86%。这与杨帆等<sup>[13]</sup>、程琨等<sup>[14]</sup>的结果相似。潇河流域2017年农田耕层有机质平均含量高于山西省耕层有机质平均含量(13.88 g·kg<sup>-1</sup>)<sup>[15]</sup>和太原市耕层土壤有机质平均含量(13.01 g·kg<sup>-1</sup>)<sup>[15]</sup>,稍低于山西省临汾盆地洪洞县耕层土壤有机质平均含量(16.05 g·kg<sup>-1</sup>)<sup>[16]</sup>。

## 2.2 潇河流域土壤有机质的空间变异结构特征

运用ArcGIS 9.3软件对土壤有机质含量进行各向同性变异函数拟合(表2),按照决定系数( $R^2$ )最大、残差(RSS)最小的原则选择最优半方差函数拟合模型,最佳理论模型为高斯模型。

空间变异主要包括随机性和结构性两部分变异。块金值 $C_0$ 表示区域化变量内部随机性的可能程度,由测量误差和最小取样间距内土壤性质的人为随机

因子(施肥、耕作措施、土地利用方式等)引起。结构方差 $C$ 是由自然因素(地质背景、地形、土壤类型等)引起土壤性状的结构变异<sup>[7]</sup>。基台值 $C_0+C$ 通常表示系统总变异,包括随机变异和结构变异。块金系数,即块金值和基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ ,表示空间异质性程度,比值高表明随机因素引起的空间变异程度较大。块金系数<25%,说明系统具有强烈的空间相关性;块金系数为25%~75%,说明系统具有中等空间相关性;块金系数>75%,说明系统空间相关性弱。变程反映在一定观测尺度下,变量的空间自相关距离,只有变程以内的空间变量才具有空间自相关性。

2017年农田土壤有机质的块金值为0.098,较1982年有所增加,表明随机变异在增加;偏基台值为0.114,较1982年有所降低,表明结构变异在降低。与1980年相比,2017年的基台值增加,即系统的总体空间变异在增加,这与前文分析的2017年土壤有机质含量的变异系数增加结果相一致。块金系数由1982年的25.99%增加至46.22%,表明随机因素(如施肥、田间管理等)在潇河流域农田土壤有机质含量空间变异中的主导作用加强。农田土壤有机质含量的空间自相关性有所减弱,仍属中等强度的空间自相关性。空间自相关距离由1982年的123.20 km减少至102.06 km,土壤有机质含量空间分布的连续性减弱,这与块金系数增加所产生的结果一致。

## 2.3 潇河流域土壤有机质空间分布特征

本文以含量1 g·kg<sup>-1</sup>为区间绘制潇河流域农田土壤有机质空间格局图(图3),由图3可以看出:1982年潇河流域土壤有机质含量空间分布呈现出中部低、南北高的趋势;2017年潇河流域土壤有机质含量具有明显的空间分布格局,呈现由中部向四周逐渐增加的

表2 土壤有机质空间变异的理论模型和相应参数

Table 2 Semi-variogram models and parameters for SOM contents in the Xiaohe River basin in 1982 and 2017

年份 Year	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget( $C_0$ )	基台值 Sill( $C_0+C$ )	块金值/基台值 Nugget/Sill	变程 Range/km	决定系数 Coefficient of determination( $R^2$ )	残差 Residual
1982	Gaussian	0.046	0.177	25.99%	123.20	0.865	0.0105
2017	Gaussian	0.098	0.212	46.22%	102.06	0.748	0.0138

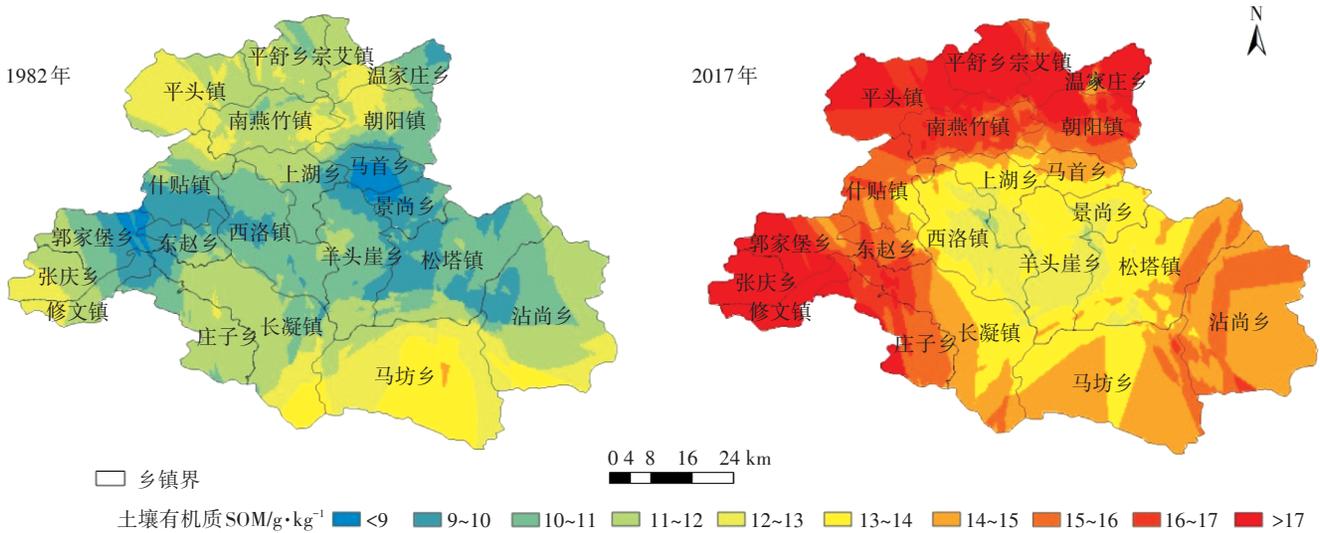


图3 1982年和2017年潇河流域土壤有机质空间分布

Figure 3 Spatial distribution of SOM in the Xiaohe River basin in 1982 and 2017

趋势。

根据全国土壤养分分级标准,山西省土壤有机质含量共分5个等级:1级( $>20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、2级( $15\sim 20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、3级( $10\sim 15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、4级( $6\sim 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、5级( $\leq 6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[5]</sup>。1982年潇河流域土壤有机质含量没有1级和2级水平,3级水平所占面积为3071 km<sup>2</sup>,占流域总面积的83.90%,4级和5级水平的面积分别占流域总面积的13.82%和2.28%。2017年潇河流域土壤有机质含量1级水平所占面积很小,为27.67 km<sup>2</sup>,仅占流域总面积的0.74%,主要位于宗艾镇、平舒乡、温家庄乡部分村庄;2级水平所占面积为1 626.50 km<sup>2</sup>,占流域总面积的43.72%,主要位于流域北部和西部,如朝阳镇、温家庄乡、宗艾镇、平舒乡、平头镇、南燕竹镇、郭家堡乡、张庆乡、修文镇、庄子乡;3级水平主要位于沾尚乡、马坊乡、松塔镇、景尚乡、马首乡、上湖乡、西洛镇、羊头崖乡、长凝镇,所占面积为2 007.80 km<sup>2</sup>,占流域总面积的53.97%;4级水平所占面积为58.03 km<sup>2</sup>,占流域总面积的1.57%,主要分布在西洛镇、羊头崖乡;无第5级水平。

#### 2.4 潇河流域土壤有机质时间分布特征

将土壤有机质增加量除以变异时间,可获得变异时间内土壤有机质的平均增长速率。计算结果表明,过去的35年间,潇河流域土壤有机质的平均增长速率为 $0.13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ,这一结果稍高于山西省近30年的平均增长速率( $0.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ )<sup>[13]</sup>。

以1982年第二次土壤普查数据为参照,统计并编制35年潇河流域土壤有机质含量变化(图4)。

1982—2017年,潇河流域有机质含量增速快的区域主要分布于北部的黄土丘陵区 and 西部的平川区,增加较慢的区域分布于流域中部和南部的河谷阶地、土石山区和石山林区。1982—2017年,北部的平舒乡、宗艾镇和温家庄乡,西部的修文镇、张庆乡、郭家堡乡农田土壤有机质含量增幅大、增量多,其中,修文镇有机质含量增量最多,有机质平均含量由1982年的 $8.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 $18.98 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平舒乡、宗艾镇、温家庄乡、郭家堡乡和张庆乡农田土壤有机质平均含量分别增加 $8.16$ 、 $7.08$ 、 $6.44$ 、 $6.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.23 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;中部上湖乡、西洛镇和南部的马坊乡增幅小、增量少,其中,马坊乡增量最少,农田土壤有机质含量基本没有变化,西洛镇和上湖乡土壤有机质平均含量分别增加 $2.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

#### 2.5 潇河流域土壤有机质空间分布格局的影响因素

对农田土壤而言,影响土壤有机质空间演变的因素有自然因素和人为因素两类,其中自然因素包括成土母质、地形、土壤质地等结构性因素,而人为因素包括耕作、人为利用等随机性因素。对2017年潇河流域土壤有机质空间变异结构特征分析结果(表2)表明,其空间变异性是由随机因素和结构因素共同决定。为充分掌握目前土壤有机质含量水平的影响因子,有效指导农业生产,对研究区域成土母质、地貌、土壤质地和人为管理措施等影响因子进行讨论。

(1)成土母质 成土母质既是土壤的骨架,也是植物矿质养料元素的最初来源,对土壤的物理、化学性质组成,土壤成土过程的性质产生直接影响,进而影

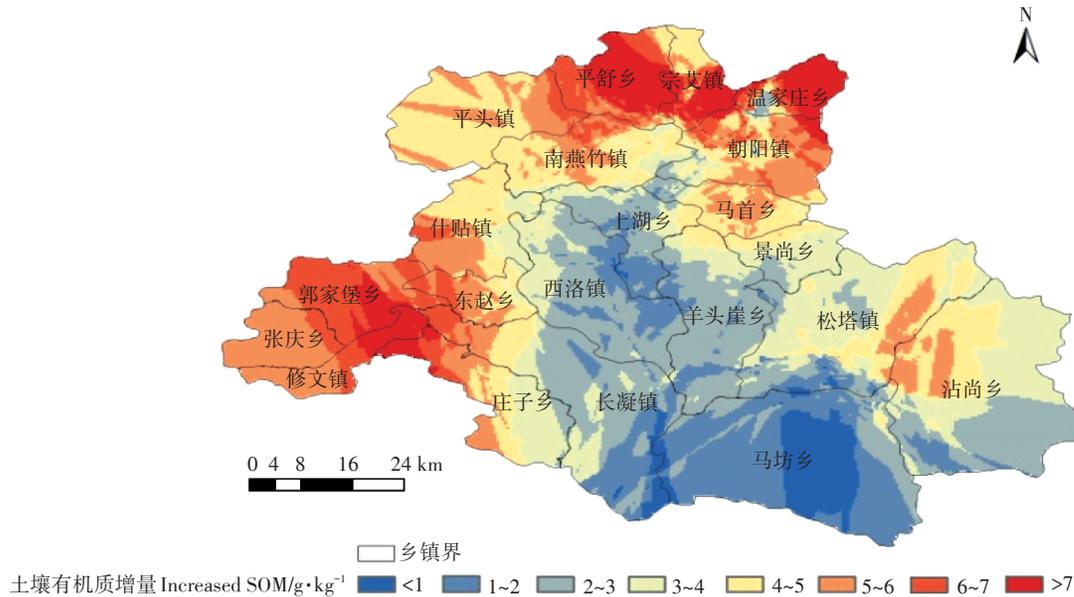


图4 1982—2017年潇河流域土壤有机质含量变化

Figure 4 Spatial variation of SOM contents in the Xiaohe River basin from 1982 to 2017

响土壤有机质的累积和淋失<sup>[6]</sup>。研究区内主要的4种成土母质发育的土壤中有有机质含量略有差异(图5),由冲积母质发育的土壤有机质含量高于其他3种母质,黄土母质与人工堆垫母质发育的土壤有机质含量接近。冲积母质土层较厚,无分选、无层理,粗细粒混存,夹有砾石,一般通透性较好,利于接纳山坡上部冲流下来的肥水肥土,因而有机质含量高;沟淤积母质大部分来源于上游地区的表土,土质较肥,矿物质种类多且成分复杂,有机质含量较高;黄土母质为潇河流域主要耕种土壤的成土母质,较疏松,质地轻,有机质含量稍低;人工堆垫母质土层不深厚,多以砂土为主,熟化程度差,土壤有机质含量低。潇河流域冲积母质主要分布在潇河下游即流域西部东赵乡、修文镇、郭家堡乡等乡镇的河谷平川地;沟淤积母质主要分布在区域北部宗艾镇、温家庄乡、南燕竹、平舒乡等乡镇的河沟地及坡地;黄土母质主要分布在流域的寿阳县各乡镇及和顺县马坊乡的垣地;人工堆垫母质主要分布在河漫滩地上,如沾尚镇、马坊乡、长凝镇、上湖乡等,与潇河流域有机质的空间分布趋势基本一致。

(2)地形和土地利用类型 潇河发源于晋中市昔阳县沾尚镇陡泉岭,自东向西贯穿寿阳县中部和榆次区中部。由潇河流域水系图(图1)和潇河流域高程图(图2)可以看出,潇河流域呈现南北高、中部由东向西逐渐降低的地势;北部是丘陵区,南部是土石山区,中部由东向西依次为丘陵区、土石山区、河谷阶地

及平川区。研究区不同地形地貌中土壤有机质含量存在显著差异(表3),其中丘陵区和平川区土壤有机质含量显著高于土石山区和河谷阶地,但丘陵区和平川区土壤有机质含量差异不显著,土壤有机质含量总的变化趋势是丘陵区>平川区>土石山区>河谷阶地。有机质含量最高值区域主要位于潇河流域北部海拔1000~1150 m之间的丘陵地带(寿阳县平头镇、平舒乡、宗艾镇、温家庄乡、朝阳镇和南燕竹镇),该区域为寿阳县主要种植区域,土地利用方式多样,主要有菜地、果园、旱地、林地等,农民对耕地管理比较精细,施肥量也较多,温家庄乡拥有丰富的煤炭资源,农民收入较高,对农业投入较多,朝阳镇为寿阳县城区,消化了大量的城市垃圾、粪便和生活污水,导致此区农田

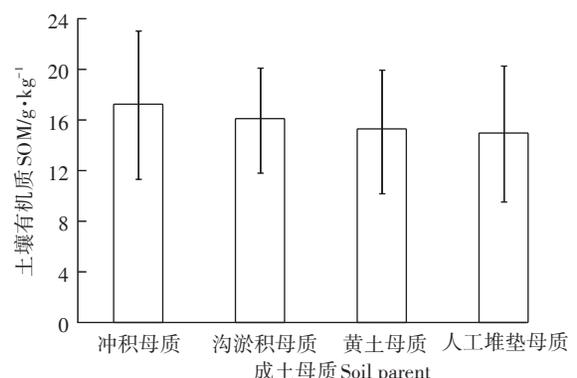


图5 不同成土母质2017年土壤有机质含量

Figure 5 Comparison of mean SOM contents in different soil parent in 2017

表3 2017年不同地形地貌土壤有机质含量  
Table 3 Descriptive statistics of SOM in  
different topography in 2017

地形 Topography	样本个数 Sample points	最大值 Max/ g·kg <sup>-1</sup>	最小值 Min/ g·kg <sup>-1</sup>	平均值±标准差 Mean±SD/g·kg <sup>-1</sup>	变异 系数 CV/%
丘陵区	110	36.07	8.16	17.08±4.92a	28.83
平川区	22	27.22	9.18	16.96±5.37a	31.67
土石山区	48	24.03	5.05	13.82±4.24b	30.66
河谷阶地	33	18.55	5.96	12.95±2.59c	20.02

土壤有机质含量高;有机质含量较高的区域位于潇河流域西部海拔750~900 m之间的平川区(张庆乡、修文镇、郭家堡乡、东赵乡、长凝镇),流域内地形平坦,修文镇为榆次区重点工业基地,长凝镇、张庆乡、郭家堡乡、东赵乡为传统农业乡镇,种植小麦、玉米、谷子等,人口密度和土地利用强度大、频繁的农业生产活动和较多的养分投入导致该区农田土壤有机质含量较高;土石山区(海拔1150~1200 m)和河谷阶地(海拔900~1000 m)土层薄、多为砂壤,土壤贫瘠,为小杂粮种植区域,不利于有机质的累积,导致有机质含量较低。

(3)土壤质地 土壤质地与土壤有机质含量密切相关,研究区域的土壤质地以中壤土为主,其次为轻壤土和砂壤土。方差分析表明,3种不同土壤质地的有机质含量存在显著差异( $F=6.25, P<0.05$ ),2017年有机质平均含量为中壤土[(16.38±4.82) g·kg<sup>-1</sup>] > 轻壤土[(15.95±3.95) g·kg<sup>-1</sup>] > 砂壤土[(13.96±4.82) g·kg<sup>-1</sup>]。进一步的多重比较表明,中壤土和轻壤土的有机质含量显著高于砂壤土,但两者之间无显著差异。通过实地调查发现,潇河流域中壤土均分布在沟地和河漫滩及一级阶地的低洼地带,地下水位浅,水分条件好,施肥量较足,土壤有机质的含量高;轻壤土所处的地形部位为梁、坡及残垣地和二级阶地等,交通较为方便,有机肥施用量较大,但水分条件稍差,土壤有机质含量较高;砂壤由于质地较轻,通气条件较好,有机质流失相对容易,因此有机质含量较低。这与李婷等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。流域中部的西洛镇和羊头崖镇主要是砂壤的土石山区,流域的北部主要发育中壤浅色草甸土和中壤淡褐土性土,这也是土壤有机质低值区和高值区分别出现在中部和北部的原因。

## 2.6 潇河流域土壤有机质时间变化影响因素

结合空间变异结构特征分析结果(表2)可以看出,35年来,土壤有机质的变异受人随机性因素的

影响越来越大,而政府大力推广和普及秸秆还田、农民大量施用有机肥和化肥、农田机械化水平的提高是潇河流域土壤有机质含量普遍提升的主要原因<sup>[18]</sup>。

(1)气候因子 区域环境及其变化会对土壤有机质的时间变异产生强烈的影响。潇河流域除西部榆次区外,其余区域均是冷凉地区。近50年,山西省和寿阳县气温均表现出升高的趋势,增加幅度为 $0.306\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ <sup>[19]</sup>和 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ <sup>[20]</sup>。潇河流域地处山西晋中冷凉地区,气温适度提升对作物/植物的生物量提高非常有利,秸秆还田量和土壤中残留根系量加大<sup>[21]</sup>,从而利于有机质的积累,因此,气候变化是近30年潇河流域农田土壤有机质增加的影响因素之一。

(2)人为随机因素 耕作管理措施是影响土壤有机质含量的另一个主要因素。全国第二次土壤普查时有机质的肥力水平是自然与人工共同作用的结果<sup>[22]</sup>。自1978年,我国推行家庭联产承包责任制,极大地提高了农民的积极性,据调查问卷和统计资料显示,潇河流域2017年的氮肥(折纯)年平均施用量 $330\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,是1982年( $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )的2.75倍;磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ )施用量为 $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,是1982年( $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )的2.25倍;钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ )施用量由1982年的 $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增至 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。肥料用量的增加提高了农作物的产量,榆次区、和顺县、昔阳县和寿阳县粮食作物的总产量由1982年的 $3026、2387、3286\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $2083\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增长到2015年的 $5858、5723、7237\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $7438\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[23-24]</sup>,从而使得作物的秸秆、根系、残茬及凋落物的数量大大增加,从而有利于有机质的累积和持续增加。

对1982年、1990年和2013年3年潇河流域各地的主要农作秸秆量进行统计(表4)<sup>[23,25-26]</sup>发现,自1982年后,秸秆的总产量逐年增长。2013年,各地农作物秸秆主要以玉米秸秆为主,随着政府的大力引导和管制以及农民环境保护意识的增强,潇河流域80%以上的农田实现了秸秆还田,使得潇河流域农田耕层的有机质大幅提高。

除了粮食作物种植结构改变外,经济作物的发展也改变着土壤有机质含量。20世纪80年代,潇河流域以种植粮食为主,但从90年代中期开始,蔬菜产业迅速发展。2015年,寿阳县的蔬菜种植面积为 $7452\text{ hm}^2$ <sup>[24]</sup>,种植区域主要在于平头、平舒、南燕竹、宗艾等几个乡镇,榆次区蔬菜种植面积为 $13\ 104\text{ hm}^2$ <sup>[24]</sup>,种植区域主要分布于修文、东赵、长凝、郭家堡等几个乡镇。由于蔬菜生产管理精细,有机肥投入量较大,这可能

表4 潇河流域不同年份农作物秸秆量(万t)

Table 4 Different crop residues yields in different years in the Xiaohe River basin(10<sup>4</sup> t)

地点 Sites	玉米秸秆量Quantity of corn straw			杂粮类秸秆量Quantity of coarse cereals straw			农作物秸秆总量Total quantity of crop straw		
	1982	1990	2013	1982	1990	2013	1982	1990	2013
榆次区	1.53	7.09	23.64	4.12	10.37	0.96	6.76	19.85	25.14
和顺县	2.37	4.35	5.82	2.54	2.44	0.60	5.11	7.09	7.31
昔阳县	7.75	11.70	19.49	4.03	5.05	0.92	12.51	17.38	20.66
寿阳县	4.30	10.05	36.48	6.40	9.61	1.12	11.34	22.22	37.97

是导致潇河流域北部和西部30年来土壤有机质增幅较大的主要原因之一。

本研究结果表明,在小流域范围内,土壤有机质受土地利用类型、地形、成土母质、人为随机因素的影响。不同土地利用类型下,输入到土壤中的有机物料种类和数量也不同,这些有机物料在土壤中的转化会影响有机质的分布。此外,人为活动的干扰,特别是农田、菜园、果园的耕作和施肥,也是引起土壤有机质差异的主要原因。不同地形条件下,土壤水、热过程差异很大<sup>[27-28]</sup>,会改变土壤有机质的累积和分解,从而对土壤有机质产生影响<sup>[29]</sup>。不同类型土壤的成土母质各不相同,成土过程也存在差异,因此,土壤有机质表现出显著差异。进入21世纪以来,我国先后启动了土壤有机质提升、耕地质量提升等重大项目,推广秸秆还田、增施有机肥、土壤改良培肥和测土配方施肥等重大技术,正在有效促进潇河流域农田土壤有机质含量稳步提升。同时,仍需加强流域土壤有机质的相关研究工作,如明确流域哪些地方土壤有机质含量容易提升、哪些地方可能下降、哪些地方会比较稳定、有机质含量是不是越多越好、不同区域的有机质含量处于什么水平比较适宜等,为实现农业可持续发展、保障国家粮食安全提供理论基础和技术支撑。

### 3 结论

(1)1982年和2017年潇河流域表层土壤有机质的平均含量分别为11.06 g·kg<sup>-1</sup>和15.69 g·kg<sup>-1</sup>,近35年潇河流域农田耕层土壤有机质呈增加趋势。

(2)1982年潇河流域土壤有机质含量空间分布呈现出中部低、南北高的趋势;2017年呈现由中部向四周逐渐增加的趋势。从第二次土壤普查时期到2017年,耕层土壤有机质含量表现为从低级向高级逐渐累积的规律。其中,土壤有机质含量大于20 g·kg<sup>-1</sup>和15~20 g·kg<sup>-1</sup>的土地面积从无增加到分别占流域总面积的0.74%和43.72%;10~15 g·kg<sup>-1</sup>土地面积

减少幅度最大,为29.93%;6~10 g·kg<sup>-1</sup>土地面积从13.82%减少到1.57%;小于6 g·kg<sup>-1</sup>土地从有到无。潇河流域有机质含量整体表现出黄土丘陵区及平川区增速快、河谷阶地和土石山区增速慢的特征。

(3)潇河流域土壤有机质含量主要受气候因子、成土母质、土壤类型、地貌、土壤质地等自然因素和土地利用、施肥、种植结构等人为因素的综合影响,其中人为因素起主导作用。应对潇河流域土壤有机质含量进行长期监测,注意土壤的培肥管理,实行分区管理,以保证整个流域农业的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 赵明松,张甘霖,王德彩,等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. 土壤学报, 2013, 50(1):1-11.  
ZHAO Ming-song, ZHANG Gan-lin, WANG De-cai, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai alluvial plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1):1-11.
- [2] 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 Ye-ting, QI Yan-bing, CHANG Qing-rui, et al. Spatio-temporal variation of soil organic matter in farmland at a country scale in Weihe plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5):1048-1053.
- [3] 赵明松,张甘霖,吴运金,等. 江苏省土壤有机质含量时空变异特征及驱动力研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(3):448-458.  
ZHAO Ming-song, ZHANG Gan-lin, WU Yun-jin, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and its driving force in Jiangsu Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3):448-458.
- [4] 邢喆,黄标,董成森,等. 江苏省沭阳县农田土壤有机质和全氮的时空变异及其影响因素[J]. 土壤, 2013, 45(3):405-411.  
XING Zhe, HUANG Biao, DONG Cheng-sen, et al. Tempo-spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in farmland and its affecting factors in Shuyang Country, Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2013, 45(3):405-411.
- [5] Huang B, Sun W X, Zhao Y C, 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):336-345.
- [6] 朱静,黄标,孙维侠,等. 长江三角洲典型地区农田土壤有机质的时空变异特征及其影响因素[J]. 土壤, 2006, 38(2):158-165.  
ZHU Jing, HUANG Biao, SUN Wei-xia, et al. Tempo-spatial variation of soil organic matter of farmland and its affecting factors in a typical

- area of the Yangtze River Delta region[J]. *Soils*, 2006, 38(2): 158-165.
- [7] 高风杰, 马泉来, 韩文文, 等. 黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1915-1922.  
GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, et al. Spatial variability and distribution pattern of soil organic matter in a mollisol watershed of China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1915-1922.
- [8] 山西省寿阳县土壤普查办公室. 寿阳土壤[R]. 寿阳, 1984.  
Soil Census Office in Shouyang County, Shanxi Province. Soil of Shouyang[R]. Shouyang, 1984.
- [9] 榆次市土壤普查办公室. 榆次土壤[R]. 榆次, 1984.  
Soil Census Office in Yuci County. Soil of Yuci[R]. Yuci, 1984.
- [10] 山西省昔阳县土壤普查办公室. 昔阳土壤[R]. 昔阳, 1981.  
Soil Census Office in Xiyang County, Shanxi Province. Soil of Xiyang[R]. Xiyang, 1981.
- [11] 和顺县农业局农业技术推广站. 和顺土壤[R]. 和顺, 1983.  
Agricultural Technology Extending Station, Heshun Municipal Bureau of Agriculture. Soil of Heshun[R]. Heshun, 1983.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.  
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [13] 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.  
YANG Fan, XU Yang, CUI Yong, 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.
- [14] 程琨, 潘根兴, 田有国, 等. 中国农田表土有机碳含量变化特征: 基于国家耕地土壤监测数据[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2476-2481.  
CHENG Kun, PAN Gen-xing, TIAN You-guo, et al. Changes in topsoil organic carbon of China's cropland evidenced from the national soil monitoring network[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2476-2481.
- [15] 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 Jian-jie, LI Fu-zhong, HU Ke-ling, 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.
- [16] 张建杰, 张强, 杨治平, 等. 山西临汾盆地土壤有机质和全氮的空间变异特征及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 839-844.  
ZHANG Jian-jie, ZHANG Qiang, YANG Zhi-ping, et al. Spatial variability of topsoil organic matter and total nitrogen in Linfen basin, Shanxi and its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 839-844.
- [17] 李婷, 张世榕, 刘浔, 等. 沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 863-868.  
LI Ting, ZHANG Shi-rong, LIU Xun, et al. Spatial variation of soil organic matter and its influence factors in the middle reaches of Tuojiang River basin[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 863-868.
- [18] Darilek J L, Huang B, Wang Z G, et al. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1/2/3): 286-292.
- [19] 苗爱梅, 武捷, 贾利冬, 等. 1958—2008年山西气温变化的特征及趋势研究[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 264-272.  
MIAO Ai-mei, WU Jie, JIA Li-dong, et al. Spatio-temporal characteristics and jump features of air temperature in Shanxi 1958—2008[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3): 264-272.
- [20] 杨红雁, 杨星星, 焦磊. 1961—2015年寿阳县气候变化特征及对玉米生产的影响[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(12): 128-134.  
YANG Hong-yan, YANG Xing-xing, JIAO Lei. Variation characteristics of climate and effect on corn production in Shouyang 1961—2015[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(12): 128-134.
- [21] 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.  
DAI Zi-jun, ZHAO Xia, LI De-cheng, 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.
- [22] 胡克林, 余艳, 张凤荣, 等. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(4): 764-771.  
HU Ke-lin, YU Yan, ZHANG Feng-rong, et al. The spatial-temporal variability of soil organic matter and its influencing factors in suburban area of Beijing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4): 764-771.
- [23] 山西省统计局. 山西统计年鉴1983[M]. 太原: 山西人民出版社, 1984.  
Statistical Bureau of Shanxi Province. Statistical yearbooks of Shanxi Province 1983[M]. Taiyuan: Shanxi People's Publishing House, 1984.
- [24] 山西省统计局, 国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.  
Statistical Bureau of Shanxi Province, Shanxi Survey Team of the National Bureau of Statistics. Statistical yearbooks of Shanxi Province 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [25] 山西省统计局. 山西统计年鉴1990[M]. 北京: 中国统计出版社, 1991.  
Statistical Bureau of Shanxi Province. Statistical yearbooks of Shanxi Province 1990[M]. Beijing: China Statistics Press, 1991.
- [26] 山西省统计局, 国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.  
Statistical Bureau of Shanxi Province, Shanxi Survey Team of the National Bureau of Statistics. Statistical yearbooks of Shanxi Province 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [27] Momtaz H R, Jafarzadeh A A, Torabi H, et al. An assessment of the variation in soil properties within and between landform in the Amol region, Iran[J]. *Geoderma*, 2009, 149(1): 10-18.
- [28] Nagamatsu D, Yoshihiko H, Mochida Y. Influence of micro-land forms on forest structure, tree death and recruitment in a Japanese temperate mixed forest[J]. *Ecological Research*, 2003, 18(5): 533-547.
- [29] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原小流域土壤pH、阳离子交换量和有机质分布特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2710-2715.  
WEI Xiao-rong, SHAO Ming-an. Distribution characteristics of soil pH, CEC and organic matter in a small watershed of the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2710-2715.