

基于多光谱遥感影像的表层土壤有机质空间格局反演^{*}

张法升^{1,2} 曲 威^{1,2} 尹光华¹ 刘作新^{1**}

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 利用多光谱 LandSat TM 遥感影像反演辽宁省阜新镇表层土壤有机质的空间格局, 筛选出与土壤有机质分布相关的 TM 波段, 分析并确定表层土壤有机质含量与 TM1、TM2、TM3、TM4、TM5、TM6、TM7 波段亮度值(digital number, DN)的相关关系, 建立了土壤有机质含量的光谱预测模型。结果表明: 研究区表层土壤有机质含量与 TM 4、TM 5 波段 DN 值呈极显著的负相关关系(r 分别为 -0.617 和 -0.623 , $P<0.001$), 与 TM 3、TM 5 波段 DN 值之间满足负二次多项式回归关系($R^2=0.9134$, $P<0.001$); 基于 TM 3、TM 5 波段 DN 值的回归模型对研究区表层土壤有机质含量的预测结果可靠($R^2=0.9151$, $P<0.001$)。研究区表层土壤有机质含量 $<10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的农田主要分布在山地边缘地带, 而平坦地区农田表层土壤有机质含量一般 $>10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 部分达到 $15\sim20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

关键词 多光谱 TM 影像 土壤有机质 空间格局

文章编号 1001-9332(2010)04-0883-06 **中图分类号** S153.6 **文献标识码** A

Spatial pattern of surface soil organic matter based on remotely sensed multispectral image. ZHANG Fa-sheng^{1,2}, QU Wei^{1,2}, YIN Guang-hua¹, LIU Zuo-xin¹ (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(4): 883–888.

Abstract: Remotely sensed multispectral LandSat TM image was used to analyze the spatial pattern of surface soil organic matter across the cropland in Fuxin Town of Liaoning Province. The proper bands of the TM image that correlated with the distribution of surface soil organic matter were selected, and the quantitative relationships between surface soil organic matter and the digital number (DN) values of bands TM 1, TM 2, TM 3, TM 4, TM 5, TM 6, and TM 7 were analyzed and determined, which could be applied to establish a prediction model of surface soil organic matter. It was shown that the surface soil organic matter in study area had a strong negative correlation with the DN values of TM 4 and TM 5 ($r=-0.617$ and -0.623 , $P<0.001$), and an inverse second order polynomial regression with the DN values of TM 3 and TM 5 ($R^2=0.9134$, $P<0.001$). The regression model using the DN values of TM 3 and TM 5 could make a reliable prediction of the spatial pattern of surface soil organic matter ($R^2=0.9151$, $P<0.001$). Across the study area, the cropland with soil organic matter content less than $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ was mainly distributed in the zones at hill foot, while that with surface soil organic matter content usually more than $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and partly reached $15\sim20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ was in flat zone.

Key words: multispectral TM image; soil organic matter; spatial pattern.

土壤是陆地生态系统的组成部分, 参与大气圈与生物圈两个碳库之间的循环, 对全球范围内生态

环境的稳定具有重要意义^[1]。土壤有机质是土壤的重要组成部分, 也是土壤肥力的核心指标之一。尽管土壤有机质只占土壤总质量的很小一部分(耕作土壤表层有机质含量通常在5%以下), 但其对土壤物理、化学和生物学等特性及各种生态学过程均能产生重要影响, 在土壤肥力、环境保护、植物生长和农

^{*} 辽宁省节水农业重点实验室项目、国家科技支撑计划项目(2008BADA4B06)、辽宁省重大科技项目(2008212003)和中国科学院陆地生态过程重点实验室开放项目资助。

^{**} 通讯作者。E-mail: liuzuoxin@yahoo.com.cn

2009-11-17 收稿, 2010-02-03 接受。

业生产等方面有着积极的作用和意义^[2-3]. 土壤作为一个连续体,土壤有机质的分布并非均一,而呈空间异质性,掌握土壤有机质的空间格局有利于准确了解土壤有机质空间分布状况,进而进一步估算土壤有机碳储量和分析生态系统碳循环,可为农田养分的精确管理和区域甚至全球范围内生态健康的可持续发展提供科学依据^[4].

土壤有机质空间格局研究主要通过测定某个或多个尺度上土壤有机质含量或相关因子,借助尺度推绎及相关模型实现目标尺度上的土壤有机质空间格局^[5],尺度推绎所使用的方法主要包括地统计学和遥感反演等. 其中,地统计学以变异函数为核心理论,借助克里格插值实现尺度上推^[6-8]. 地统计学理论比较详尽、计算方法较可靠,且能提供尺度上推的估计方差,在土壤有机质空间格局研究中得到了大量应用,效果也较理想. 但地统计学通常要求采样规则化,数据量较大的野外采样和室内分析导致负担和成本较高,且实时性差、观测周期较长^[9-13]. 遥感技术是一门新兴的综合性探测技术,可实现短时间内对同一地区进行重复观测、并获得大面积的同步数据,且遥感影像记录的信息可反映土壤的多种特征,因而被广泛应用于土壤调查和土地评价^[14-16]. 表层土壤有机质含量的高低会影响土壤的反射光谱特征,因而利用遥感影像可反演表层土壤有机质含量及其空间格局^[17-18]. 利用遥感技术观测表层土壤有机质空间格局具有费用低、精度高和实时性强等特点. 自 20 世纪 70 年代开始,有学者在利用遥感影像反演表层土壤有机质及其空间格局方面做了一些研究^[19-20],证明了其应用的可行性,总结出影像解译和模型建立的一些经验方法,以及影响该技术反演土壤有机质精度的因素,如景观尺度上土壤母质的差异可能会降低遥感影像与土壤有机质之间的相关性、长期农田耕作管理措施的差异会造成土壤有机质空间分布的相应变化等^[21-22]. 以往的研究往往存在诸多不一致性,如结论不一致、尺度不一致以及运用的遥感数据各不相同,因此,需要更多此类研究进一步讨论以确定通用性强的方法与模型. 随着遥感技术的发展,高质量的遥感影像和逐渐成熟的遥感影像解译技术将使遥感影像在观测土壤特性空间格局研究中得到越来越多的应用.

尽管目前遥感技术已经发展到了高光谱时代,但基于高光谱技术的土壤有机质反演多集中在室内或田间操作层面^[17,23],其研究结果存在不一致性且实用性有待提高;而基于航空高光谱遥感影像反演

土壤有机质的研究还少有尝试^[24],且高质量的高光谱航空影像数据获取成本太高,其应用可行性和普及性有待进一步研究. 因此,本研究以美国航空卫星 LandSat 5 记录的多光谱 TM 影像为试验遥感影像,通过几何校正、投影变换、降噪等手段处理并解译遥感影像,分析了乡镇尺度上表层土壤有机质含量与多波段 TM 影像亮度值(DN)之间的相关性,并建立了回归模型,从而反演获得表层土壤有机质的空间格局,以期农业生产管理和土壤可持续利用提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于辽宁省西北部阜新县阜新镇(42°01'50"—42°15'22" N, 121°31'12"—121°48'51" E). 该区受东亚季风影响,属北温带大陆性气候,年均气温 7.1℃~7.6℃,年均降水量仅 480 mm,且年内分配极不均匀,60%降水集中在 6—8 月,年均水面蒸发量为 1746 mm,属风沙半干旱区. 阜新市农业人口占总人口的 50% 以上,粮食作物种植面积占耕地面积的 75%,主要粮食作物为玉米、大豆和花生,种植方式主要为玉米连作以及部分玉米与花生、大豆等间作和轮作. 研究区 10 月底秋收生产完成,作物的经济部分被收获,作物秸秆移出农田,田间除部分作物根茬外全部裸露,因此,遥感影像可直接反映土壤表层反射光谱特征.

1.2 采样设计

2006 年 10 月底,通过手持式全球定位系统(GPS)在阜新镇范围内的农田定位随机选取了 27 个样点. 取样深度为 0~20 cm,在 30 m×30 m 内采用五点取样法获得 1 个样本,样本带回实验室充分风干,过 2 mm 筛,采用重铬酸钾氧化-比色法测定土壤有机质含量. 另选取 6 处道路交叉点及河流交汇处作为几何校正的地面控制点.

1.3 遥感影像及预处理

遥感图像为 2006 年 10 月 27 日 LandSat 5 拍摄的多光谱 TM 遥感影像,与地面采样时间一致. 利用阜新镇区域图裁剪出研究图像区域,将控制点数字化后做投影变换(横轴墨卡托投影)对遥感图像进行几何校正,重采样方法为二次多项式模型;采用 5×5 滤波处理消除微地形、地物阴影和地貌差异以及成像过程等在遥感影像上造成的噪声,处理方法^[19]如下:

$$P_{DN}(x,y) = \sum_{k=x-2l=y-2}^{x+2} \sum_{y-2}^{y+2} [W(k,l) \times P_{DN}(k,l)]$$

式中： $P_{DN}(x,y)$ 为滤波处理后 (x,y) 处的 DN 值； $P_{DN}(k,l)$ 为 (k,l) 处的 DN 值； $W(k,l)$ 为 $P_{DN}(k,l)$ 的权重系数,其值为 $1/25$, 其中 $x-2 \leq k \leq x+2, y-2 \leq l \leq y+2$. 由 27 个取样点处 TM 影像各波段上的光谱 DN 值可得到各个波段 DN 值与表层土壤有机质含量的相关关系,利用分析结果进行回归分析并建立表层土壤有机质含量的光谱预测模型.

采用平均误差 (ME) 和均方根误差 ($RMSE$) 对模型预测土壤有机质的准确性进行评价,算式如下:

$$ME = \frac{\sum_i^n (M_i - P_i)}{n}$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (M_i - P_i)^2}{n - 1}}$$

式中: M_i 和 P_i 分别为表层土壤有机质含量的实测值和预测值; n 为土壤样本数. 平均误差的正负值可反映预测模型的过高 ($ME<0$) 或过低 ($ME>0$) 估计趋势,均方根误差则能体现预测模型的精度及准确性^[25].

10 月底阜新镇农田土壤表面干燥且少有植被覆盖,而且航空飞行器 LandSat 5 拍摄 TM 影像时研究区上空的云层含量为零,可以认为遥感影像记录的土壤光谱反射特征为真实的土壤光谱特征,通常认为反射率较低(DN 值较低)的土壤有机质含量较高. 由于研究区域内水体、植被覆盖以及城镇建筑、道路等因素的影响,使非农田区域内 TM 影像的光谱反射特征不能反映土壤有机质的真正含量,但考虑到本文中取样点均分布在阜新镇的农田内,不会对预测模型的精度造成影响,因此,本研究不做其他处理.

1.4 数据处理

采用 SAS 9.1 统计软件对多光谱 TM 影像各波

段 DN 值与表层土壤有机质含量进行描述性统计分析、主成分分析和 Pearson 相关分析,对筛选波段与表层土壤有机质含量进行二元非线性回归分析.

2 结果与分析

2.1 遥感影像 DN 值与表层土壤有机质含量的关系

研究区 TM 影像 7 个波段的亮度覆盖中, TM 5 最宽(达 138 级),其次为 TM 4(达 90 级), TM 6 最小(仅 28 级);标准差也是 TM 5 最高,其次为 TM 4(表 1). 较大的极差和标准差表明波段 TM 4 和 TM 5 的 DN 值的离散程度较大,其反映的土壤差异性最显著、信息量最丰富. 进一步对各波段 DN 值进行主成分分析(表 2)可知,第一主成分分量信息占 TM 影像 7 个波段总信息量的 67.3%,其中波段 TM 5 和 TM 4 的特征向量较高,分别为 0.940 和 0.905,说明第一主成分中 TM 5 和 TM 4 的 DN 值贡献最大,包含的信息量也最丰富,而 TM 1 ~ TM 3、TM 6、TM 7 波段所包含的信息量有限. 由表 3 可以看出, TM 4 与 TM 5 DN 值的相关系数最高($r=0.922, P<0.00$);其次为 TM 2 与 TM 3($r=0.905, P<0.00$),表明这些波段 DN 值之间的重叠较多;可见光 3 个波段(TM 1 ~ TM 3)之间及其与波段 TM 4 DN 值之间的相关性也较大;TM 6、TM 7 DN 值有较大的独立性. 对于相关性高、数据之间有重叠的波段,需要

表 1 研究区 TM 影像各波段 DN 值的统计分析
Tab.1 Statistical analysis for DN value of TM bands in the study area

波段 Band	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	中值 Median	标准差 SD
TM 1	50	107	66.4	67	4.3
TM 2	19	59	31.5	32	3.4
TM 3	17	82	38.7	40	6.3
TM 4	4	94	46.6	48	12.4
TM 5	9	147	84.0	93	17.9
TM 6	98	123	113.7	114	3.1
TM 7	12	85	43.2	44	5.6

表 2 研究区 TM 各波段 DN 值的主成分分析
Tab.2 Principal components analysis for DN value of the TM bands in study area

主成分 Principal component	方 差 Variance (%)	特征向量 Eigenvector						
		TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 6	TM 7
1	67.348	0.361	0.281	0.687	0.905	0.940	-0.045	0.412
2	11.903	-0.222	-0.134	-0.088	-0.120	0.365	0.650	0.596
3	9.297	-0.070	0.250	0.076	0.180	-0.148	0.710	-0.606
4	6.588	0.362	0.241	0.304	-0.546	-0.560	0.175	0.276
5	2.769	0.775	-0.517	-0.263	0.036	0.098	0.190	-0.127
6	1.351	-0.158	-0.568	0.541	0.430	-0.381	0.062	0.146

表 3 研究区 TM 各波段 DN 值的相关系数
Tab.3 Correlation coefficient of DN values of the TM bands in the study area

	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 6
TM 2	0.786 **					
TM 3	0.838 **	0.905 **				
TM 4	0.706 **	0.777 **	0.788 **			
TM 5	0.481 *	0.550 **	0.588 **	0.922 **		
TM 6	-0.235	-0.061	-0.078	-0.115	0.215	
TM 7	0.206	0.192	0.319	0.131	0.626 **	0.314

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

通过筛选手段以确定预测土壤有机质含量的最佳波段或波段组合。

考虑到土壤有机质特性与土壤反射光谱的非线性关系,对表层土壤有机质含量作对数转换后与 TM 影像各波段 DN 值进行相关性分析.结果表明,表层土壤有机质含量的对数值与 TM 4 和 TM 5 的 DN 值呈极显著负相关关系(r 分别为 -0.617 和 -0.623 , $P<0.001$),与其他波段 DN 值的相关性并不显著(表 4).由于 TM 4 与 TM 5 的 DN 值相关性很大,数据重叠较多,且 TM 5 波段的信息量更丰富,而可见光波段 TM 1~TM 3 的 DN 值之间相关性较高,且这 3 个波段 DN 值与表层土壤有机质含量的相关性接近显著水平($P<0.13$).因此,本文选择 TM 5 和 TM 3 的 DN 值与表层土壤有机质含量进行回归分析,回归效果较优,满足负二次多项式回归关系.回归方程如下:

$$\text{SOM} = 358.4614 + 22.7306 \times (DN_{\text{TM}3})^{-2} - 65457.7003 \times (DN_{\text{TM}5})^{-1} + 3067486.357 \times (DN_{\text{TM}5})^{-2}$$
式中: SOM 为表层土壤有机质含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); $DN_{\text{TM}3}$ 和 $DN_{\text{TM}5}$ 分别为波段 TM 3 和 TM 5 的 DN 值.回归方程的 $R^2=0.9134$ 、 $F=126.5996$ 、 $P<0.001$.回归方程的系数检验结果见表 5,波段 TM 5 DN 值的各项系数均通过了统计学意义上的显著性检验,但波段 TM 3 DN 值的唯一系数虽然未通过检验,但 P 值(0.154)较小,因此,在方程中仍保留了波段 TM 3 的 DN 值.

表 4 表层土壤有机质含量与遥感影像 DN 值的相关系数(r)及检验
Tab.4 Correlation coefficients (r) and significant test between surface SOM content and image DN values in study area

变量 Variable	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 6	TM 7
r	-0.356	-0.360	-0.303	-0.617	-0.623	-0.017	-0.082
P	0.069	0.065	0.124	0.000	0.000	0.932	0.684

表 5 回归方程系数的检验
Tab.5 Test for coefficients of the regression equation

系数 Coefficient	系数值 Value	标准误差 Standard error	t 检验 t test	概率 Probability
常数 Constant	358.46	64.93	5.52	$P<0.001$
$DN_{\text{TM}3}$ 二次项系数 Coefficient of ($DN_{\text{TM}3}^{-2}$)	22.73	6.49	1.47	$P=0.154$
$DN_{\text{TM}5}$ 一次项系数 Coefficient of ($DN_{\text{TM}5}^{-1}$)	-65457.70	11404.55	-5.74	$P<0.001$
$DN_{\text{TM}5}$ 二次项系数 Coefficient of ($DN_{\text{TM}5}^{-2}$)	3067486.36	49944.49	6.14	$P<0.001$

2.2 遥感影像光谱 DN 值与表层土壤有机质含量回归模型的精度验证

本研究中回归模型的平均误差 (ME) 为 -0.0115 ,说明模型有微弱的过高估计趋势,但基本可以忽略;RMSE 值为 0.061,表明模型估计效果较可靠.图 1 显示实测值与预测值间存在斜率为 0.9073 的线性关系($R^2=0.9151$, $P<0.001$),表明预测结果能较好地再现样区表层土壤有机质的空间分布状况.

2.3 研究区表层土壤有机质含量的空间格局

研究区表层土壤有机质含量实测值与预测值的最大值、最小值、平均值以及变异系数基本一致,表明研究区农田土壤有机质含量的变化范围保持在 $8 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,但接近 30% 的变异系数显示研究区表层土壤有机质含量属中等程度的空间变异性^[26](表 6).考虑到研究区的地貌类型以山地、丘陵为主,同时存在大量城镇、道路和局部植被、河流乡间,为消除这些因素对预测结果的干扰,对预测结果进行统计分析后,将研究区土壤分为四类(这 4 类土壤的 SOM 含量分别在 $<10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $10 \sim 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、

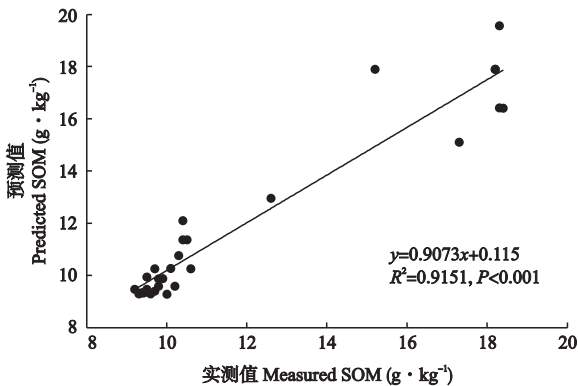


图 1 模型精度的验证
Fig.1 Validated result for model precision.

表 6 研究区表层土壤有机质含量实测值与预测值的统计分析
Tab.6 Statistical analysis of predicted and measured value of surface SOM content in the study area

	最大值 Maximum (g · kg ⁻¹)	最小值 Minimum (g · kg ⁻¹)	平均值 Mean (g · kg ⁻¹)	标准差 SD (g · kg ⁻¹)	变异系数 CV (%)
实测值 Measured value	18.4	8.8	12	3.50	29.17
预测值 Predicted value	19.5	9.2	12	3.35	27.92

15 ~ 20 g · kg⁻¹和>20 g · kg⁻¹;土地面积分别占研究区土地总面积的 19.88%、22.97%、9.93% 和 47.22%),利用不同类别的差异性显现表层土壤有机质含量的变化范围和空间分布格局.据此作图,可获得研究区农田表层土壤有机质含量的空间分布状况和格局(图 2).

去除山地、丘陵和水体等非农田因素外,研究区农田主要分布在南部平坦地区、山脚的坡地以及最西部的小区域内,其中表层土壤有机质含量<10 g · kg⁻¹的区域主要分布在山地、丘陵地区的边缘地带,由于阜新镇区域内山地较多,导致此类农田大量存在.阜新镇年降水量稀少,灌溉水资源非常缺乏,土壤干旱导致农田生产力水平较低,限制了土壤有机质的积累和土壤肥力的提高,农业生产效益不高.研究区主要的高生产力农田集中在南部的平坦地区.此类农田土壤有机质含量稍高,在 10 ~ 15 g · kg⁻¹之间(22.97%),少量(9.93%)土地土壤有机质含量

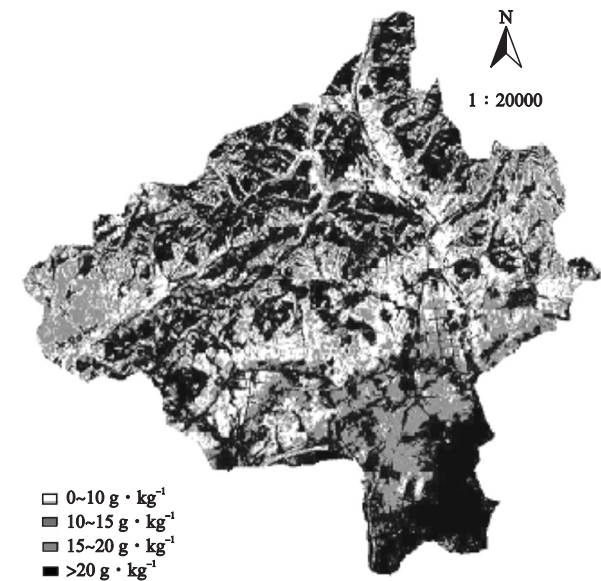


图 2 研究区表层土壤有机质含量分类结果分布
Fig.2 Distribution of the classification result for the surface SOM content in the study area.

超过 15 g · kg⁻¹,这些地区是阜新镇农业生产的核心地区,也是人口和城镇的主要聚集地区.>20 g · kg⁻¹的土壤类型不能真实反映土壤有机质含量,一般为水体、植被、城镇和道路等.

3 讨 论

与传统方法相比,利用 TM 影像结合地面取样分析表层土壤有机质含量空间格局的方法具有很多优势,主要体现在可大大节省时间、节约成本,而且预测结果的准确性和实用性将为土壤肥力的提高和土地可持续利用的宏观管理提供有力工具.本研究中 TM 波段 DN 值与表层土壤有机质含量的非线性关系与 Chen 等^[19]和李欣宇等^[20]的研究结果相似,但根据这种非线性相关性建立的预测模型却存在较大差别,原因可能与地面取样及研究的尺度不同、研究土壤存在差异和模型选择等有关.利用遥感数据观测表层土壤有机质含量的关键在于寻找相关的土壤光谱特征参数,如反射率、反射率的数学变换形式、波段的组合等. LandSat 卫星拍摄的 TM 影像只是众多遥感手段的一种,并且 TM 影像本身也在发展当中.伴随光谱学、遥感技术的发展,高分辨率、高光谱遥感影像会提供越来越多的供试土壤光谱特征,利用多光谱以及高光谱遥感数据反演土壤有机质含量显示出广阔的应用发展前景.

研究区表层土壤有机质含量较低,原因主要与该地区干旱少雨的气候特征以及局部的成土母质差异有关.干旱气候以及灌溉水资源有限导致土壤水分含量低、植物生产力低、土壤微生物活性低、土壤动植物残体归还土壤少,使有机质在土壤中的积累缓慢,土壤有机质含量偏低.除此之外,农业生产中以化学肥料为主、收获后的农作物秸秆作为农户的燃料和部分动物饲料而几乎全部被移出土壤生态系统,土壤有机肥的施用量很少,使土壤有机质维持在较低的平衡状态.针对研究区农田类型、分布状况以及气候特征,农业生产管理中应注意增施有机肥,还可采取秸秆还田等措施,以提高土壤有机质含量、保持土壤的可持续利用.

参考文献

[1] Sparling GP, Wheeler D, Vesely ET, et al. What is soil organic matter worth? *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**: 548–557
[2] Singer MJ, Munns DN. *Soils: An Introduction*. New Jersey: Prentice Hall, 1996
[3] Huang C-Y (黄昌勇). *Soil Science*. Beijing: China

- Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [4] Zeng D-H (曾德慧), Jiang F-Q (姜凤岐), Fan Z-P (范志平), *et al.* Ecosystem health and sustainable development for human. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(6): 751–756 (in Chinese)
 - [5] Leemans R. Scientific challenges for anthropogenic research in the 21th century: Problems of scale// Ehlers E, Krafft T, eds. *Earth System Science in the Anthropocene*. Berlin: Springer, 2006: 249–262
 - [6] Wang Z-Q (王政权). *Geostatistics and Its Application in Ecology Science*. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
 - [7] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 1999, **89**: 1–45
 - [8] Iqbal J, Thomassond JA, Jenkinse JN, *et al.* Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**: 1338–1350
 - [9] Zhang F-S (张法升), Liu Z-X (刘作新), Zhang Y (张颖), *et al.* Scaling effect on spatial variability of soil organic matter in crop land. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (中国科学院研究生院学报), 2009, **26**(3): 350–356 (in Chinese)
 - [10] Jiang Y (姜勇), Zhang Y-G (张玉革), Liang W-J (梁文举), *et al.* Spatial variability of soil nutrients in cultivated surface soil of Sujiatun District, Shenyang City. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(10): 1673–1676 (in Chinese)
 - [11] Zhang F-S (张法升), Liu Z-X (刘作新), Shen Y-J (沈业杰), *et al.* Spatial variability of soil organic matter in small scale across a cropland. *Ecological Science* (生态科学), 2009, **28**(6): 532–536 (in Chinese)
 - [12] Shu QS, Liu ZX, Si BC. Characterizing scale- and location-dependent correlation of water retention parameters with soil physical properties using wavelet techniques. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**: 2284–2292
 - [13] Wang ZY, Shu QS, Liu ZX, *et al.* Scaling analysis of soil water retention parameters and physical properties of a Chinese agricultural soil. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, **47**: 821–827
 - [14] Zhao Y-S (赵英时). *Methods and Theories of Remote Sensing Applications and Analysis*. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)
 - [15] Ren J-Q (任建强), Chen Z-Q (陈忠群), Tang H-J (唐华俊). Regional scale remote sensing-based yield estimation of winter wheat by using MODIS-NDVI data: A case study of Jining City in Shandong Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(12): 2371–2375 (in Chinese)
 - [16] Wu Y-K (吴亚坤), Yang J-S (杨劲松), Li X-M (李晓明). Study on spatial variability of soil salinity based on spectral indices and EM38 readings. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (光谱学与光谱分析), 2009, **29**(4): 1023–1027 (in Chinese)
 - [17] Chen Z-W (陈增文), Chen G-S (陈光水), Zhong X-F (钟羨芳), *et al.* Review on estimations of soil organic carbon content based on hyperspectral measurements. *Journal of Subtropical Resources and Environment* (亚热带资源与环境学报), 2009, **4**(1): 78–87 (in Chinese)
 - [18] Zhang W-J (张文娟), Wang S-Q (王绍强), Chang H (常华), *et al.* Application of remote sensing technique in soil carbon storage researches. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2005, **24**(3): 118–126 (in Chinese)
 - [19] Chen F, Kissel DE, West LT, *et al.* Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**: 746–753
 - [20] Li X-Y (李欣宇), Yu W-T (宇万太), Li X-Z (李秀珍). Spatial distribution pattern of surface soil organic carbon based on TM image. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(3): 333–338 (in Chinese)
 - [21] Yin Y-F (尹云锋), Cai Z-C (蔡祖聪), Qin S-W (钦绳武). Dynamics of fluvo-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilization. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(5): 875–878 (in Chinese)
 - [22] Yang J-C (杨景成), Han X-G (韩兴国), Huang J-H (黄建辉), *et al.* The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(4): 787–796 (in Chinese)
 - [23] Liu H-J (刘焕军), Zhang B (张柏), Zhao J (赵军), *et al.* Spectral models for predication of organic matter in black soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2007, **44**(1): 27–32 (in Chinese)
 - [24] Gomez C, Rossel RAV, McBratney AB. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field VIS-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, 2008, **146**: 403–411
 - [25] Webster R. Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**: 331–340
 - [26] Lei Z-D (雷志栋), Yang S-X (杨诗秀), Xu Z-R (许志荣), *et al.* Research spatial variability of soil properties. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 1985(9): 10–21 (in Chinese)

作者简介 张法升,男,1984年生,博士研究生.主要从事土壤特性空间分析研究,发表论文3篇. E-mail: fasheng06@163.com

责任编辑 杨弘