

段贺天,尹海魁,李新旺,等. 基于信息熵的土壤有机碳空间分布影响因子及尺度效应研究[J]. 江苏农业科学,2023,51(21):225-231.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.21.034

# 基于信息熵的土壤有机碳空间分布影响因子及尺度效应研究

段贺天<sup>1,4</sup>, 尹海魁<sup>1</sup>, 李新旺<sup>2</sup>, 陈亚恒<sup>3,4</sup>, 刘微<sup>5</sup>, 王树涛<sup>3,4</sup>

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院,河北保定 071000; 2. 河北省水利科学研究院,河北石家庄 050011;

3. 河北农业大学国土资源学院,河北保定 071000; 4. 河北省农田生态环境重点实验室,河北保定 071000;

5. 河北大学化学与环境科学学院,河北保定 071000)

**摘要:**为探明土壤有机碳空间分布的影响因子及其与土壤有机碳含量之间的尺度效应,以河北省阜平县为研究区,采用信息熵分析法的模型分析土壤亚类、高程、坡度、土地利用现状与土壤有机碳含量之间的空间相关性,研究各影响因子在不同空间尺度下的特征和尺度效应。结果表明,不同尺度的关键影响因子不同,大尺度土壤有机碳含量的关键影响因子是高程;随着尺度减小,其他影响因子的相关性相对变大。具体结论如下:(1)在大尺度(阜平县)上,与土壤有机碳含量的空间相关性最大的是高程,其次是土壤亚类、坡度,最小的是土地利用现状;在中尺度(大沙河)上,与土壤有机碳含量的空间相关性最大的是土壤亚类,其次是高程、土地利用现状,最小的是坡度;在小尺度(阜平县)上,与土壤有机碳含量的空间相关性最大的是高程,其次是土地利用现状、土壤亚类,最小的是坡度;(2)本研究得出的结论是基于特定的样本空间范围,需要考虑在其他区域或空间尺度上的适用性,还要综合分析其自然条件和人为影响因素。期待本研究结果可为区域合理利用土地和碳库保护提供科学依据及技术支撑。

**关键词:**信息熵;土壤有机碳;空间相关性;尺度效应;影响因子

**中图分类号:**S181;F323.211 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)21-0225-07

随着全球变暖问题的加剧,全球碳循环已成为相关研究的重点;土壤作为地球表面最大的碳库,在全球碳循环中起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。土壤有机碳是土壤有机化合物中的碳元素,其固持和积累对于维持土壤肥力以及调节陆气碳交换起到至关重要的作用。在不同因子的影响下,有机碳在不同尺度表现出不同的空间分布特性<sup>[2]</sup>。因此,研究不同尺度土壤有机碳分布的关键影响因子,对维持土壤肥力和碳库保护等具有重要意义。

影响土壤有机碳空间分布的关键因子主要有土壤类型、高程、坡度、土地利用现状等。张忠启等对土壤亚类的碳组分含量进行研究,发现不同土壤类型的固碳能力和有机碳含量有明显差异<sup>[3]</sup>。高琳等基于我国土壤系统分类土纲,分析了河北省不同土纲土壤的有机碳含量和密度的差异<sup>[4]</sup>。木衣

那恰·吐斯甫汉等研究发现,不同类型土壤的有机碳含量差异大<sup>[5]</sup>。土壤在时间和空间尺度上都是连续存在的,它的空间异质性很强,不受尺度大小的影响<sup>[6]</sup>。地形是影响土壤空间异质性的关键因子,土壤有机碳含量在空间上的变化与地形因子密切相关<sup>[7]</sup>。郭月峰等对内蒙古黄花甸子流域进行研究,发现土壤有机碳含量和坡度、高程具有函数关系<sup>[8]</sup>。不同的土地利用方式造成植被的物种多样性和生产力差异,进而影响土壤有机碳的含量和性质。李春丽等通过研究不同土地利用方式下的土壤有机碳含量,发现人类活动对东北黑钙土区土壤有机碳分布及含量有显著影响<sup>[9]</sup>。土壤的属性受研究数据尺度因子的影响,是因为土壤在空间上有明显的变异特性<sup>[10]</sup>。有学者发现,土壤和空间尺度呈函数关系,不同尺度上的相同变量存在较大差异,小尺度下的结构特征受半方差函数随机成分影响,而这个成分随着样品距离的增加而增加<sup>[11-12]</sup>。这些成果主要应用于土壤氮素、全钾等方面的研究<sup>[13-15]</sup>。

当前对影响土壤有机碳分布因子的研究较为丰富,但结合熵理论分析不同尺度土壤有机碳关键

收稿日期:2023-02-27

基金项目:河北省重点研发计划(编号:22327301D)。

作者简介:段贺天(1997—),男,河北赵县人,硕士研究生,研究方向为土壤与土地资源持续利用。E-mail:861945632@qq.com。

通信作者:王树涛,博士,教授,研究方向为土地持续利用。E-mail:wangshutao78@126.com。

影响因子的研究还较为鲜见。本研究在搜集河北省阜平县土壤有机碳含量、土壤亚类、数字高程模型 (DEM)、土地利用现状等相关数据之后,基于信息熵理论,采用定量化手段研究阜平县、大沙河流域、阜平镇这 3 个不同尺度上土壤有机碳含量与土壤亚类、高程、坡度、土地利用现状之间的尺度效应,并确定不同尺度上土壤有机碳分布的主要影响因子,旨在揭示土壤有机碳含量的多尺度变异特征和机制,为区域土地利用规划和碳库管理提供科学依据和技术方法。

## 1 研究区域概况

阜平县位于河北省西部,地势从西北到东南逐渐降低,县域土壤类型可分为 6 个土类、13 个亚类、35 个土属、114 个土种。阜平县土地总面积为 249 396.95  $\text{hm}^2$ ,林地、草地面积占土地总面积的 83.8%,有机碳含量总体上受人类活动影响较小,受自然因素影响相对较大。大沙河属大清河分支,流域面积约 83 495.28  $\text{hm}^2$ 。阜平镇位于大沙河中下游,面积约 27 036.45  $\text{hm}^2$ 。有机碳监测点位以及研究区范围见图 1。



图1 研究区 3 级空间尺度关系

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源及处理

2.1.1 数据来源 本研究参考的阜平县数据包括 2009—2017 年土壤有机质监测数据、土壤亚类和 DEM 海拔。土地利用现状数据来自 2019 年土地变更调查数据库。有机碳资料主要来自野外取样和实地勘察,一共记录 3 747 个点位,点位分布均匀

(图 1)。土壤亚类数据参考全国土壤划分标准,包括 12 个土壤亚类。DEM 数据来自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30 m。

2.1.2 数据处理 反距离权重法:利用 ArcGIS 软件 Geostatistical Analyst 进行空间插值,获得阜平县土壤有机碳含量的 30 m  $\times$  30 m 的图层(图 2-a)。

DEM 数据处理:借助 ArcGIS 10.2 软件,根据阜平县的边界文件,将下载得到的大范围高程数据进行切割处理,最终得到阜平县的高程图。采用表面工具得到阜平县的坡度图层(图 2-c、图 2-d)。

土地利用现状数据处理:采用 ArcGIS 10.2 软件平台对土地利用现状进行重新分类,按照阜平县具体现状分为建设用地、园地、农用地、乔木林地、灌木林地、河流、草地共 7 种(图 2-e)。

图层相交叠加:以上述成图的 shp 文件作为输入源,进行相交操作,获得阜平县全县域的叠加图版图,可以认为每个图斑内部的土壤有机碳含量以及各类影响因子含量相一致,输出图层由 5 320 个图斑组成。经过中尺度和小尺度裁剪之后,中尺度图斑个数为 3 660 个,小尺度为 1 256 个。大尺度叠加图斑见图 3。

### 2.2 研究方法

2.2.1 土壤有机碳含量的反距离插值法 空间插值技术是一种将离散点数据转换为连续面数据的方法,可以反映研究区域内土壤指标的空间分布和变化<sup>[16]</sup>。反距离插值法是一种常用的空间插值方法,根据样点与待插值点之间的距离,按照一定的函数计算待插值点的权重,距离越近权重越大,反之越小。这种方法可以充分利用样点的空间属性,同时给出插值误差的估计。由于实际采样条件的限制,往往无法获得区域内所有位置的土壤指标数据,因此需要通过空间插值技术来推断未采样位置的数据。样点数据的数量和分布对插值结果有很大影响;一般来说,样点越多,分布越均匀,插值结果越准确。插值结果见图 2-a。

2.2.2 信息熵分析法 信息熵分析法是一种基于信息论的空间相关性分析方法,可以用来研究土壤有机碳的空间分布与其影响因子之间的关系。信息熵是一种衡量信息量或不确定性的指标,反映随机变量或信源所包含的平均信息量。信息熵越大,表示随机变量或信源的不确定性越大,信息量越多;反之则越小。信息熵分析法的优点是不受变量类型的限制,可以同时处理定性和定量变量,也可以

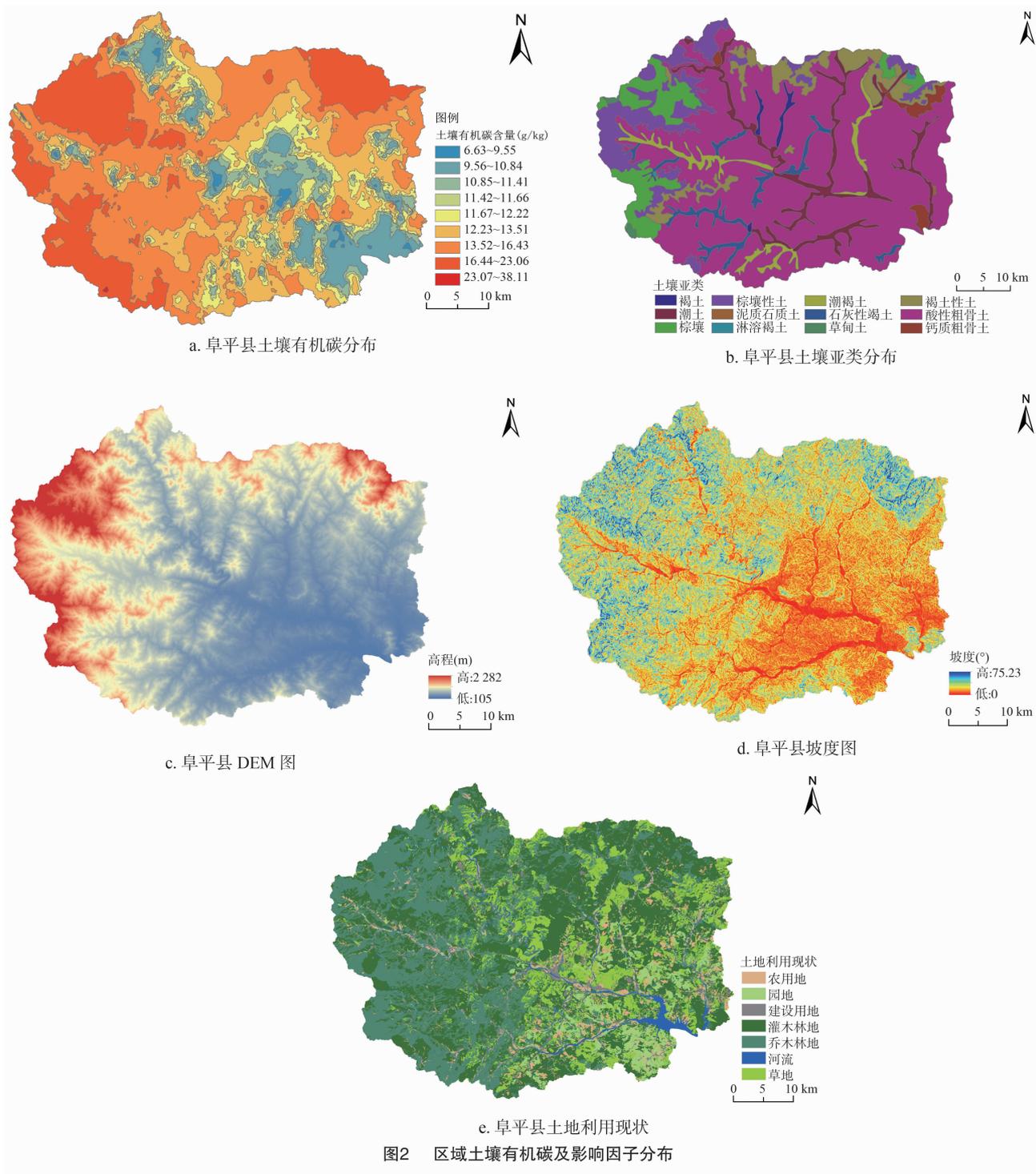


图2 区域土壤有机碳及影响因子分布

处理多个变量之间的相关性<sup>[17]</sup>。信息熵的计算公式是对自信息的数学期望,自信息是对单个事件发生所包含信息量的度量。信息熵计算公式如下:

$$H(x) = E[I(x_i)] = \sum_{i=1}^n \left[ P(x_i) \log_a \frac{1}{P(x_i)} \right] = - \sum_{i=1}^n [P(x_i) \log_a P(x_i)]. \quad (1)$$

式(1)中: $x$ 表示自变量; $P(x_i)$ 为发生事件 $x_i$ 的概

率; $n$ 表示发生的数量,对数的底 $a$ 一般取2。当 $X$ 、 $Y$ 都成为变量时,它们同时发生的概率为 $P(x_i, y_j)$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ),则 $X$ 、 $Y$ 的联合信息熵 $H(X, Y)$ <sup>[18]</sup>为:

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [P(x_i, y_j) \log_2 P(x_i, y_j)]. \quad (2)$$

可以用 $X$ 、 $Y$ 的联合信息熵除 $X$ 、 $Y$ 信息熵之和表示 $X$ 、 $Y$ 之间的相关性,这里用指标 $K$ 描述 $X$ 、 $Y$ 之

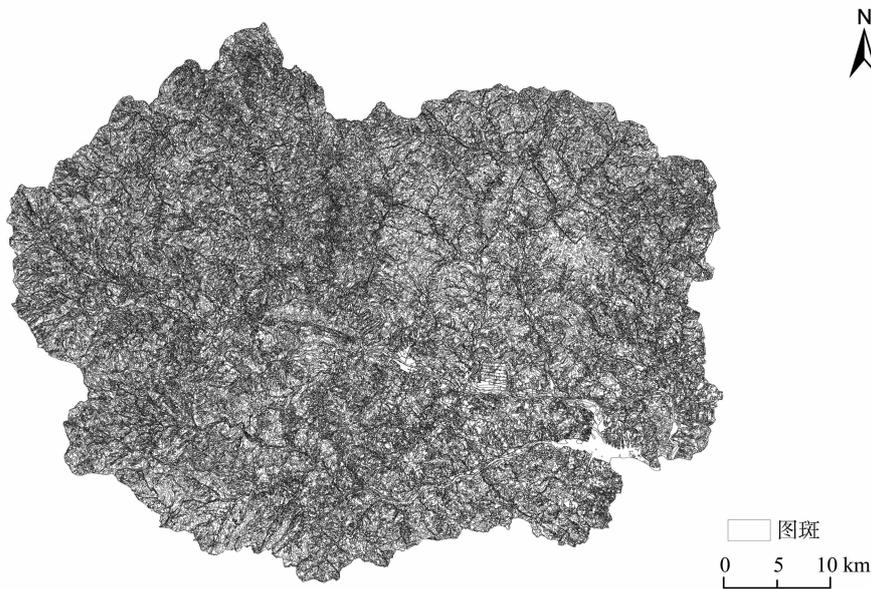


图3 大尺度叠加图斑

间的相关性:

$$K = 1 - \frac{H(X, Y)}{H(x) + H(y)} \quad (3)$$

因为  $X, Y$  的联合信息熵  $\leq X, Y$  的信息熵之和, 所以  $K$  值范围为  $[0, 1]$ ;  $K$  越小, 说明  $X, Y$  的相关性越小, 反之亦然<sup>[19]</sup>。若  $K$  不为 0, 就代表  $X, Y$  具有相关性。本研究借助  $K$  值表征阜平县不同尺度下土壤亚类、高程、坡度、土地利用现状等影响因素与土壤有机碳含量之间的尺度效应。

**2.2.3 影响因子空间尺度效应研究方法** 在研究土壤有机碳含量与环境因子的空间相关性时, 可以采用 2 种不同的分析方法, 以揭示不同尺度和不同因子对土壤有机碳含量的影响规律。第 1 种方法是在确定 1 个环境因子后, 分别计算它在不同空间尺度与土壤有机碳含量的相关性, 然后比较相关性的大小。第 2 种方法是在确定 1 个空间尺度后, 分别计算不同环境因子在该尺度上与土壤有机碳含量的相关性, 然后比较相关性的高低。本研究有 3 级尺度和 4 个影响因子, 具体方法见图 4。

### 3 结果与分析

#### 3.1 计算结果

利用信息熵分析土壤有机碳含量与土壤亚类、高程、坡度、土地利用现状之间的  $K$  值。信息熵分析方法利用不同尺度土壤有机碳含量及其影响因子的分布概率和联合分布概率  $P(x_i)$ 、 $P(y_j)$ 、 $P(x_i, y_j)$ 。在反距离插值处理的基础上, 充分考虑各尺度

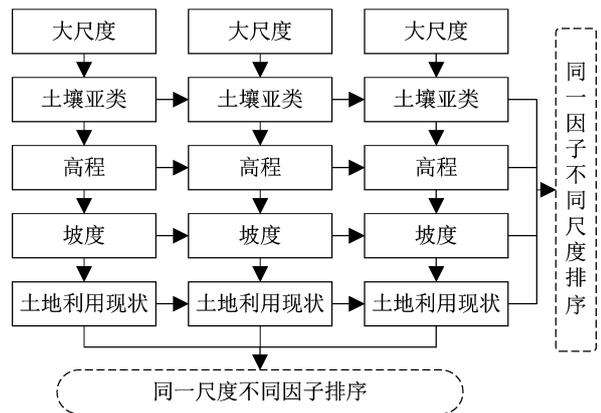


图4 尺度效应研究方法

土壤有机碳含量的分布情况, 计算出有机碳含量区间; 高程区间根据阜平县现状进行等分得出; 坡度区间根据不同尺度坡度数值分布情况得出。本研究列出阜平县(大尺度)下的概率矩阵。其中无数值区域为不存在相交图斑, 数值为 0 的区域存在对应图斑, 但其分布概率  $< 0.000\ 05$  (表 1)。

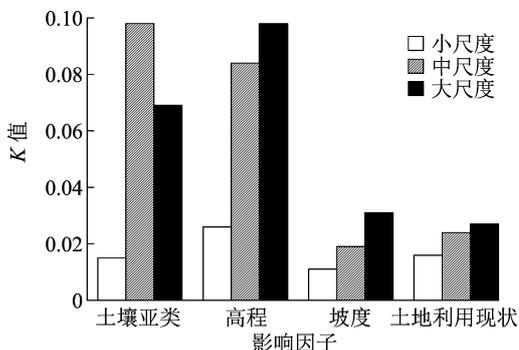
得到概率矩阵后, 参考信息熵分析公式进行计算。首先, 选择 3 个空间尺度, 然后在每个尺度上计算土壤有机碳含量与各个环境因子(土壤亚类、高程、坡度、土地利用现状)之间的空间相关性, 即信息熵方法中的  $K$  值。 $K$  值越大, 表示 2 个变量的空间分布相关性越大, 反之越小; 其次, 将计算得到的  $K$  值用图形展示(图 5); 最后, 根据图表中的数据, 发现在 3 个尺度上所有环境因子与土壤有机碳含量的  $K$  值都  $> 0$ , 说明它们之间存在着一定程度的空间相关性, 即空间分布有一定的规律性。

表1 土壤有机碳含量与高程之间的联合分布概率矩阵

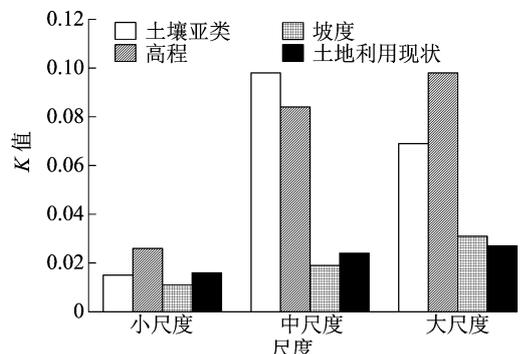
高程 (m)	不同土壤有机碳含量点位联合分布概率									合计
	6.63 ~ 9.55 g/kg	9.56 ~ 10.84 g/kg	10.85 ~ 11.41 g/kg	11.42 ~ 11.66 g/kg	11.67 ~ 12.22 g/kg	12.23 ~ 13.51 g/kg	13.52 ~ 16.43 g/kg	16.44 ~ 23.06 g/kg	23.07 ~ 38.11 g/kg	
105 ~467	0.004 8	0.061 1	0.044 1	0.021 2	0.057 0	0.101 5	0.052 8	0.003 3		0.345 9
468 ~830	0.001 1	0.012 2	0.012 6	0.006 6	0.023 0	0.085 6	0.167 9	0.032 8	0.000 1	0.341 9
831 ~1 193	0.000 1	0.002 3	0.002 6	0.002 3	0.007 3	0.021 5	0.082 9	0.065 7	0.000 1	0.184 8
1 194 ~1 556		0	0.000 2	0.000 1	0.000 4	0.001 4	0.018 4	0.065 0		0.085 5
1 557 ~1 919		0	0	0	0.000 1	0.000 3	0.005 3	0.030 4		0.036 2
1 920 ~2 282		0	0	0	0.000 1	0.000 2	0.000 9	0.004 5		0.005 7
合计	0.006 1	0.075 6	0.059 5	0.030 3	0.087 9	0.210 3	0.328 3	0.201 8	0.000 2	

### 3.2 结果与分析

本研究选择了3个不同的空间尺度,分别为县级、流域级、乡镇级,然后在每个尺度上,比较4个环境因子(高程、土壤亚类、坡度、土地利用现状)与土壤有机碳含量的空间相关性,根据 $K$ 值的大小,对4个环境因子在每个尺度上进行排序,并判断哪些因子是影响土壤有机碳含量的关键因子,即 $K$ 值最大的因子。根据图5发现,在大尺度(阜平县)上,高程与土壤有机碳含量的空间相关性最大,其次是土壤亚类、坡度,土地利用现状的空间相关性最小;在中尺度(大沙河)上,土壤亚类与土壤有机碳含量的空间相关性最大,其次是高程、土地利用现状,坡度的空间相关性最小;在小尺度(阜平镇)上,高程与土壤有机碳含量的空间相关性最大,其次是土地利用现状、土壤亚类,坡度的空间相关性最小。在不同的空间尺度上,4个影响因子与土壤有机碳含量的空间相关性和排序都有所差异,甚至有些因子在某些尺度上是关键因子,而在另一尺度上则不是。

图5 不同影响因子在各尺度上的 $K$ 值

与土壤有机碳含量的相关性都呈减小的趋势,但是高程的变化速度明显快于其他2个因子。土壤亚类与土壤有机碳含量的相关性在中尺度上最大,可能是因为中尺度上土壤亚类的变化能够反映土壤有机碳的空间分布规律,而在大尺度上土壤亚类的变化受到气候、地形等因素的影响,在小尺度上土壤亚类的变化受到人为干扰和管理等因素的影响。高程、坡度、土地利用现状与土壤有机碳含量的相关性随空间尺度的减小呈减小趋势,可能是因为这些因子在大尺度上对土壤有机碳的空间分布有较强的控制作用,而在小尺度上则受到其他因素的干扰。因此,在研究土壤有机碳含量与环境因子的空间相关性时,应该考虑不同的空间尺度,以充分揭示不同尺度上的影响规律和尺度效应。在大尺度上,可根据不同土壤亚类、高程,对土壤有机碳进行合理保护;在小尺度上,采取合理利用土地的方式保护碳库,以期在各个尺度进一步增加土壤有机碳的含量。

图6 不同空间尺度上各影响因子的 $K$ 值

根据图6发现,土壤亚类在中尺度上与土壤有机碳含量的相关性最大,在小尺度上相关性最小;而高程、坡度、土地利用现状则随着尺度的减小,其

在研究区域空间尺度由小到大的过程中,土壤亚类、高程的 $K$ 值几乎呈直线上升趋势。由表2可知,小尺度存在6种土壤亚类,且仅酸性粗骨土分布

概率超过 80%,其他土壤亚类平均不超过 5%,土类单一;中尺度有 9 种土壤亚类,酸性粗骨土分布概率降到 60%,土类变得复杂;大尺度上虽然有 12 种土类,但酸性粗骨土占比略有下降,新增加的 3 种土类分布概率较低,因此土壤亚类与土壤有机碳含量空间相关系数随尺度从小到大呈先增后减趋势;而高程、坡度、土地利用现状随着空间尺度增大,它们的空间分异程度都会增加,从而与土壤有机碳含量空间分异的相关性也随之增加。土地利用现状与土壤有机碳含量的相关性虽然随尺度减小而呈减小趋势,但其在 4 种影响因子中占据的比例呈上升趋势;在大尺度上相关性排第 4 位,中尺度上升到第 3 位,小尺度上升到第 2 位。这是因为阜平县地处山区,生态保护政策较为严格,人为影响程度较小;随着尺度的减小,人类活动带来的影响逐步增加,从而对土壤有机碳含量的影响也逐步增强。随着尺度的变化,坡度和土壤有机碳含量的相关性变化不是很明显。但是已有研究表明,土壤有机碳空间分布受到坡度等地形因子的显著影响,坡度和高程一样具有空间尺度效应<sup>[20-21]</sup>。

表 2 土壤亚类在不同空间尺度的分布概率

土壤亚类	分布概率		
	小尺度	中尺度	大尺度
潮褐土	0.019 2	0.009 5	0.028 3
潮土	0.091 1	0.085 5	0.058 3
钙质粗骨土	0	0.004 2	0.014 8
褐土	0.007 8	0.009 1	0.006 3
褐土性土	0.015 0	0.033 7	0.073 8
淋溶褐土	0	0	0.000 9
泥质石质土	0	0	0.000 4
山地草甸土	0	0	0.001 5
石灰性褐土	0.066 2	0.025 7	0.028 3
酸性粗骨土	0.800 8	0.629 1	0.623 2
棕壤	0	0.090 2	0.066 2
棕壤性土	0	0.112 9	0.098 1

## 4 讨论

### 4.1 土壤有机碳的影响因素

本研究选取阜平县作为研究对象,采用地理信息系统和信息熵分析方法,探讨土壤亚类、高程、坡度、土地利用现状这 4 种因素对土壤有机碳含量的影响程度和相关性。其中,土壤亚类、高程、坡度可以反映自然环境对土壤有机碳含量的影响,而土地利用现状可以反映人类活动对土壤有机碳含量的

影响。在不同的空间尺度上,发现土壤有机碳含量与这些因素之间存在一定的相关性,但是不同尺度上的相关性大小并不相同。

本研究未考虑大气沉降对土壤有机碳含量的影响,因为该区域缺乏长时间序列的大气沉降监测数据,而大气沉降是一个周期较长、随机性较大的过程,需要充分的数据支持才能进行有效分析<sup>[22]</sup>。

### 4.2 不同尺度土壤有机碳变化

随着研究区域空间尺度的增大,土壤有机碳含量与各个因子的空间相关性也发生了变化。在大尺度上,土壤亚类、高程是关键因子,这与现有研究所呈现的规律<sup>[23]</sup>相符。在中尺度上,高程与土壤有机碳含量的相关性因高程分区多样性的减少而降低,土壤亚类的相关性因土壤亚类分布情况更加复杂而增加。在小尺度上,土地利用现状对土壤有机碳含量的影响排序较高,这是因为在小尺度上,人类活动的影响较大而导致的。

本研究针对地理特征空间异质性问题进行了深入分析。地理特征空间异质性,是指地理现象在空间上的分布和变化具有不均匀性和复杂性。这种特征导致不同空间尺度下的研究结果可能存在差异。因此,不能简单地将某一尺度上得出的结论推广到另一尺度的研究中,而需要综合考虑自然条件和人为影响因素的作用。同时,筛选关键影响因子至关重要,根据不同尺度的特点选择合适的影响因子,才能保证评估结果的可靠性。

### 4.3 尺度划分的依据

本研究以阜平县为研究对象,根据不同空间单位的面积和影响土壤有机碳含量分布因子的变化规律<sup>[24]</sup>,将阜平县划分为 3 级空间尺度,大尺度代表  $>1\ 000\ \text{km}^2$  的空间范围,是指阜平县整体的空间单元,主要考虑阜平县的地理位置、气候条件、土地利用类型等因素;中尺度代表  $500 \sim 1\ 000\ \text{km}^2$  的空间范围,是指阜平县内部的几个区域划分,主要考虑不同区域的地形地貌、植被覆盖、土壤类型等因素;小尺度代表  $<500\ \text{km}^2$  的空间范围,是指阜平县内部的具体地块划分。本研究选择这 3 级空间尺度进行研究,一方面是因为在这 3 级空间尺度在面积上存在较大差距,能够体现出空间尺度对土壤有机碳含量分布的影响程度;另一方面是因为这 3 级空间尺度上,各因子对土壤有机碳含量分布的影响呈现不同的规律。

## 5 结论

基于信息熵发现阜平县不同尺度上各个影响因子的相关性如下:在大尺度(阜平县)上,高程与土壤有机碳含量的空间相关性最大,其次是土壤亚类、坡度,土地利用现状最小;在中尺度(大沙河)上,土壤亚类与土壤有机碳含量的空间相关性最大,其次是高程、土地利用现状,坡度最小;在小尺度(阜平镇)上,高程与土壤有机碳含量的空间相关性最大,其次是土地利用现状、土壤亚类,坡度最小。

本研究得出的影响因子与土壤有机碳含量的空间关系是基于特定的样本空间范围,需要考虑其 在其他区域或空间尺度上的适用性,还要综合分析其自然条件和人为影响因素。

### 参考文献:

[1]王 瑾. 土壤理化性质及外源养分添加对土壤有机碳平均周转时间的影响[D]. 南京:南京信息工程大学,2022.

[2]李 理,朱文博,刘俊杰,等. 宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(3):687-695.

[3]张忠启,于东升,潘剑君,等. 红壤典型区不同类型土壤有机碳组分构成及空间分异研究[J]. 土壤,2015,47(2):318-323.

[4]高 琳,龙怀玉,陈晓远,等. 基于中国土壤系统分类土纲的河北省土壤有机碳和氮含量与密度对比分析[J]. 江苏农业学报,2022,38(3):657-665.

[5]木衣那恰·吐斯甫汉,武红旗,侯艳娜,等. 新疆北疆不同土壤类型有机碳含量变化特征及其影响因素分析[J]. 新疆农业科学,2022,59(6):1513-1521.

[6]吴彦军,汪景宽,李双异,等. 黑土土壤质量演变初探V. 东北主要黑土区表层土壤有机碳密度分布及碳库估算[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(4):535-539.

[7]宋丰骥,常庆瑞,钟德燕. 黄土高原沟壑区土壤养分空间变异及其与地形因子的相关性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(12):166-172,180.

[8]郭月峰,姚云峰,秦富仓,等. 地形因子对老哈河流域土壤有机碳的影响[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(2):156-161.

[9]李春丽,董 军,王鸿斌,等. 不同利用方式黑钙土有机碳组分割

面分布特征[J]. 水土保持学报,2022,36(5):304-310,318.

[10]Wang D, Chakraborty S, Weindorf D C, et al. Synthesized use of VisNIR DRS and PXRF for soil characterization: total carbon and total nitrogen[J]. Geoderma,2015,243/244:157-167.

[11]赵 军,刘焕军,隋跃宇,等. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J]. 水土保持学报,2006,20(1):41-44,62.

[12]张文婷. 江西省不同地貌单元耕地土壤有机碳空间变异的尺度效应[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(11):2619-2628.

[13]史海滨,陈亚新. 土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值[J]. 水利学报,1994,25(7):70-77,89.

[14]于 婧,周 勇,聂 艳,等. 江汉平原耕地土壤氮素空间尺度套合与变异规律研究[J]. 中国农业科学,2007,40(6):1297-1302.

[15]Ni J R, Li X X, Borthwick A G L. Soil erosion assessment based on minimum polygons in the Yellow River Basin, China [J]. Geomorphology,2008,93(3/4):233-252.

[16]宋金茜,朱 权,姜小三,等. 基于GIS的农业土壤重金属风险评价研究:以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报,2017,54(1):81-91.

[17]李秀霞,朱 伟,张子豪,等. 基于信息熵的土壤Cr含量空间分布与土地利用空间相关性研究[J]. 生态与农村环境学报,2020,36(11):1437-1443.

[18]徐全智,吕 恕. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2004:65-66.

[19]檀满枝,詹其厚,陈 杰. 基于信息熵原理的土壤pH影响因素空间相关性分析[J]. 土壤,2007,39(6):953-957.

[20]郝艺晴,田慧敏,胡晓杰,等. 坡度和季节变化对鸡公山栓皮栎林土壤呼吸速率的影响[J]. 浙江林业科技,2021,41(6):9-14.

[21]谢柠粉,王 棋,李 冰,等. 坡度和坡位对植烟坡地紫色土有机碳氮变化的影响[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(9):2245-2252.

[22]袁吉有,苏以荣. 大气氮沉降对森林土壤碳输入输出过程的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版),2021,43(3):577-586.

[23]魏宇宸,卢晓丽,朱昌达,等. 基于地形与遥感辅助信息的小流域尺度高分辨率有机碳空间分布预测研究[J]. 土壤学报,2023,60(1):63-76.

[24]胡云锋,徐芝英,刘 越,等. 地理空间数据的尺度转换[J]. 地球科学进展,2013,28(3):297-304.