

## 黑土耕作层土壤 pH 空间变异及自相关分析<sup>①</sup>

高凤杰<sup>1</sup>, 鞠铁男<sup>1</sup>, 吴 啸<sup>1</sup>, 王钰堯<sup>1</sup>, 李昕哲<sup>1</sup>, 樊 平<sup>1</sup>, 栾 天<sup>1</sup>, 周 军<sup>2\*</sup>

(1 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2 黑龙江省环境科学研究院, 哈尔滨 150036)

**摘 要:**以东北黑土耕作区土壤表层(0~20 cm)土壤 pH 为研究对象,以经典统计学和地统计学为基础,结合“3S”技术及 Moran 指数进行空间自相关分析,剖析黑土区土壤 pH 的空间自相关类型及其分布格局。研究结果表明:小流域土壤 pH 均值为 6.72,变异系数为 9.91%,其变程为 1 000 m,具有较强空间自相关性,空间变异受地形、成土等结构性要素影响较大,在东-西(E-W)方向的空间变异相对剧烈;土壤 pH 与高程等地形因子显著性相关,地理加权克里格插值显示土壤 pH 高值出现在研究区中部旱地,低值出现在东部与西部区域,呈现带状分布,与土地利用类型的东西向交替相近。全局自相关分析表明研究区土壤 pH 存在较强的正自相关特征,且不同方向存在差异;随着距离的增大,土壤 pH 呈现负自相关特征,分布存在空间孤立。局部空间自相关类型主要为 H-H 型(高-高关联)和 L-L 型(低-低关联),空间集聚特征明显,其中 H-H 型主要分布于研究区中部旱地区域,形成高 pH 且高度空间自相关的格局,L-L 型分布于东部林地区域,形成低 pH 集聚的格局。

**关键词:**黑土耕作层;地统计;土壤 pH;空间自相关

**中图分类号:**S158 **文献标识码:**A

东北地区黑土是比较肥沃的土壤之一,是我国重要的商品粮生产基地,其土壤肥力的维持和提升关系到该区域农业的可持续发展和国家粮食安全<sup>[1]</sup>。土壤 pH 作为土壤基本的理化性质,影响着土壤中许多化学反应和化学过程<sup>[2-3]</sup>,从而影响植物和微生物所需养分的有效性,支配着化学物质在土壤中的行为,是土壤养分和重金属等污染物有效性和迁移性的重要限制性因素<sup>[4-5]</sup>,在土壤生态系统物质循环、能量流动、土壤质量及生产力的维持和保育以及土地资源持续利用方面具有重要作用<sup>[6]</sup>。因此,土壤 pH 的空间分异规律得到了学术界的广泛关注,目前多数研究采用地统计学方法与 GIS 相结合的方式,揭示土地利用方式、地形条件、土壤类型等对土壤 pH 的影响<sup>[7-8]</sup>,在土壤资源培育、管理及有效利用等方面具有重要指导意义,而结合其空间自相关研究比较少见。地统计学是通过块基比或变程来定量表征空间变异特点,但不能描述具有离散特点(即空间负相关)空间变量的特征,也不能对变程等进行显著性检验;而空间自相关分析法不仅能反映变量的正负空间自相关特点<sup>[9]</sup>,而且可以对空间相关的显著性进行检验,与地统计学相比,

空间自相关分析法在衡量自相关时更为严格<sup>[10]</sup>,从而对地理变量的空间分布特征进行深入剖析。海沟河流域位于松嫩平原东南部底端,是东北黑土区边缘地带典型小流域,主要是由林地、旱地和水田构成的复合型土地利用景观格局模式,是林地向黑土耕地的过渡地带,具有较高的环境敏感性和生态脆弱性<sup>[11-13]</sup>。土壤盐碱化是松嫩平原主要环境问题之一,因此掌握农田的土壤 pH 的空间分布特征及其影响因素十分重要。

本文以东北黑土区边缘地带的典型小流域为研究案例,综合应用“3S”技术、地统计学方法,探究黑土区海沟河小流域耕作层土壤 pH 的空间分布格局及其主要影响因子,运用空间自相关分析方法揭示土壤 pH 的空间自相关特征,识别土壤 pH 的空间集聚区和空间孤立区,旨在为区域内土壤的培育及耕地质量提升服务,进一步为区域精确施肥及农业生产过程提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

海沟河小流域位于黑龙江省哈尔滨市东郊阿城

基金项目:国家重点研发计划课题子课题(2016YFD0201009)和国家自然科学基金项目(31700407)资助。

\* 通讯作者(zhoujunhky@126.com)

作者简介:高凤杰(1981—),女,河北迁西人,博士,副教授,主要从事资源环境遥感研究。E-mail: gaojiecumt@126.com

区境内,地理坐标为  $126^{\circ}55'45'' \sim 127^{\circ}10'05'' \text{ E}$ ,  $45^{\circ}34'18'' \sim 45^{\circ}40'50'' \text{ N}$ ,海拔高度为  $54 \sim 366 \text{ m}$ ,属典型的黑土丘陵区,流域总面积  $120 \text{ km}^2$ (图 1)。境内土壤类型主要为黑土,兼有部分草甸土、白浆土和暗棕壤。气候类型属于中温带大陆性季风气候,多年平均气温  $3.9^{\circ}\text{C}$ ,年降水量  $600 \sim 800 \text{ mm}$ 。地形条件复杂,东部为高山丘陵区,中部为起伏的漫川漫岗区,西部靠近海沟河下游地势相对平坦,呈东高西低之势,土地利用方式从东至西,依次为林地、旱地和水田,具有鲜明的海拔地带性。距省会哈尔滨  $35 \text{ km}$ ,受城市快速发展的辐射作用较强,流域内部交通发达,土地利用变更剧烈,资源承载负荷较重,在社会经济迅速发展的同时,境内生态环境问题不断恶化,主要表现为土壤肥力下降、水土污染较重、生态脆弱性凸显等。

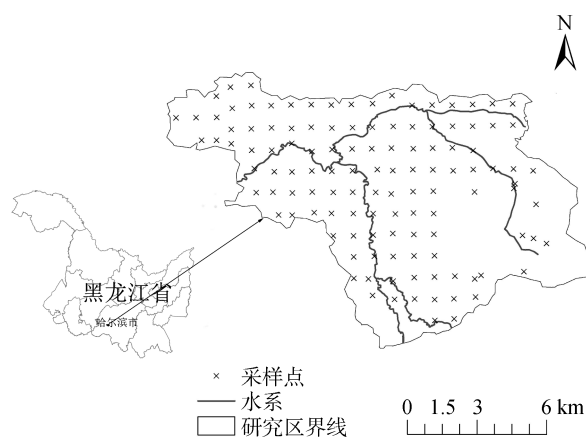


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

## 1.2 样品采集与分析

样点的布设与采集:在综合考虑研究区地形、土地利用的基础上,进行室内网格布点,用于指导野外实地采样工作,每个网格面积约  $0.81 \text{ km}^2$ ,共布设了 120 个土壤采样点(图 1)。为避免作物生长、施肥等因素的影响,于 2014 年 11 月农作物收割后进行野外采样。采样过程中,通过手持 GPS 进行空间定位,并尽可能与室内预布点位一致,横向和纵向均间隔  $900 \text{ m}$ 。采样点的布设直接影响采样数据的代表性和有效性,一般认为充分小的采样间隔和足够多的样本可以代表土壤属性真实的变异特征<sup>[15]</sup>。采用五点法采集土壤表层  $0 \sim 20 \text{ cm}$  耕层土壤,用“四分法”取混合均匀的样品约  $1 \text{ kg}$ ,并分别记录采样点周边环境信息。

测试分析:将采集的土壤样品在实验室内进行自然风干,用木棒压碎挑出砾石草根等杂物研磨

过筛,土壤 pH 测定采用 PHS-25 酸度计(土水比为  $1:2.5$ ),测定指标具体分析方法参照鲍士旦编写的《土壤农化分析》<sup>[16]</sup>。

## 1.3 数据处理及方法

考虑到采样及指标测试误差,本文采用格拉布斯(Grubbs)法对实验数据进行异常值识别和处理,剔除明显偏离平均值的数据,后续相关计算分析也均采用异常值处理后的数据进行<sup>[21]</sup>。采用 SPSS 19.0 进行描述性统计分析,GS+9.0 进行半方差函数的计算及理论模型的拟合,Geoda 软件进行空间自相关分析,地理加权插值在 ArcGIS 10.0 中进行,并用 ArcView 和 Origin 9.0 软件绘图。

## 1.4 研究方法

空间自相关一般用来检测空间要素的异质性和空间集聚特征,根据研究的侧重点不同,又分为全局性空间自相关(global spatial autocorrelation, GSA)和局部空间自相关(local indicators of spatial association, LISA)两种类型。Moran's I 指数作为一种常用的空间自相关指数,主要用于检验某一空间要素在空间上是否存在依赖关系,并进一步量化要素间的相互关系,在诸多学科中有较为广泛的应用<sup>[10, 17]</sup>。

1.4.1 全局空间自相关 是从整体尺度对地理空间要素在空间上是否存在集聚特征进行描述的统计量,本研究以全局性 Moran's I 为基础,对土壤 pH 空间自相关特征随空间距离变化的趋势进行探讨,同时分析不同方向上土壤 pH 的 Moran's I 随空间距离变化的特征。其中,全局性 Moran's I 常见的一般过程为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: $n$  为空间数据的个数; $x_i$  和  $x_j$  分别为  $i$  区、 $j$  区的空间要素的属性值; $\bar{x}$  为所有空间数据的平均值; $w_{ij}$  为空间权重矩阵的元素,空间权重矩阵一般为对称矩阵,且  $w_{ij} = 0$ 。

对于全局 Moran's I,一般使用标准化统计量  $Z(I)$  来检验空间要素空间自相关性的显著性水平,其一般公式为:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}}; E(I) = \frac{-1}{n-1} \quad (2)$$

式中: $\text{Var}(I)$  为 Moran's I 的理论方差; $E(I)$  为 Moran's I 的理论期望值。在  $0.05$  水平下,当  $|Z| > 1.96$  时,表明该空间要素存在空间自相关,否则不存在空间自相关。

1.4.2 局部空间自相关 是全局空间自相关的分

解形式,其实质是将全局空间自相关性分解到更小的空间单元,可以进一步量化具体空间要素与周围要素之间的差异程度及其显著性。局部空间相关 Moran's I 系数的一般过程为:

$$I = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中:各变量的含义与全局自相关 Moran's I 系数公式(1)相同。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

海沟河小流域土壤 pH 样点集的描述性统计特征值见表 1。从表 1 可以看出,土壤 pH 范围 4.98 ~ 9.02,平均值为 6.72,变异系数为 9.91%。结合一般的 CV 评估标准(当 CV < 0.1 时,为弱变异程度;当 0.1 < CV < 1 时,为中等变异程度;CV > 1 时为强变异程度),研究区土壤 pH 变异系数程度较低,说明海沟河小流域土壤 pH 的空间变异受随机因素的影响相对较小,与高海峰等<sup>[3]</sup>及魏孝荣和邵明安<sup>[13]</sup>的研究结论相似。

表 1 土壤 pH 描述性统计  
Table 1 Descriptive statistics of soil pH

样本点	均值	极小值	极大值	标准差	偏度	峰度	变异系数(%)	K-S 检验
20	6.72	4.98	9.02	0.618	0.416	-0.186	9.91	0.86

2.2 土壤 pH 与外部指标相关性分析

在 SPSS 19.0 中,对海沟河小流域的土壤 pH 与基本地形因子(高程、坡度)、复合地形因子(平面曲率、剖面曲率)及外部环境因子(到水系距离、到村子距离、到道路距离)进行相关性分析,进而提取与 pH 显著相关的指标因子,结果见表 2。由表 2 可以看出,海沟河小流域土壤 pH 与高程呈显著负相关( $r = -0.182$ ),与水系距离呈极显著正相关( $r = 0.332$ ),与村子距离呈显著负相关( $r = -0.231$ ),是影响研究区

pH 空间分布的重要因子。高程对土地利用方式影响较大,土地利用及作物种植类型变化在一定程度上可以造成土壤酸碱度的变化;其次,距水系距离在土壤养分的长久运移过程中影响了土壤养分的运移方向及累积过程,距离水系近的地方地势一般较低,是土壤水分及养分的“汇”区域,极大地促进相关累积过程,进而影响土壤 pH;人类活动对土壤 pH 也具有一定程度的影响,如施肥施药、排污、秸秆处理等因素均可能造成土壤 pH 变化。

表 2 研究区土壤 pH 与外部指标相关性  
Table 2 Correlation coefficients between soil pH and terrain indexes

指标	高程	坡度	水系距离	交通距离	村子距离	平面曲率	剖面曲率
pH	-0.182*	-0.112	0.332**	0.069	-0.231*	-0.069	0.077

注:\*\*表示在  $P < 0.01$  水平(双侧)上显著相关;\*表示在  $P < 0.05$  水平(双侧)上显著相关。

2.3 半方差函数的结构分析

借助 GS9.0+ 软件,运用地统计学对研究区土壤 pH 进行分析,得到土壤 pH 的半方差函数模

型(图 2)及相关拟合参数(表 3)。结果表明土壤 pH 的半方差理论模型为高斯模型(Gaussian)时,决定系数为 0.860,拟合程度较高。

表 3 土壤 pH 半方差函数模型及参数  
Table 3 Parameters of semivariogram models of soil pH

指标	理论模型	块金值( $C_0$ )	基台值( $C_0+C$ )	块金效应 $C/(C_0+C)$	变程(m)	$R^2$
pH	高斯	0.130	0.405	0.679	1 000	0.860

在地统计学中,一般认为块金值( $C_0$ )能够揭示区域变量在小于抽样尺度上发生突然变异的程度;基台值( $C_0+C$ )是所有变异的总和,基台值近似于采样方差;块金效应( $C/(C_0+C)$ )也称基底效应,表征了系统内随机部分引起的变异占系统总变异的比例<sup>[18]</sup>,能够有效地反映出土壤养分的空间依赖性,表明系统变量

空间相关性的程度。海沟河小流域土壤 pH 的块金值为 0.130,表明研究区内存在某种生产生态过程影响土壤 pH 空间分布。土壤养分的空间变异性受自然的结构性因素和人为的随机性因素的共同作用,结构性因素(土壤类型、地形等)会导致土壤养分空间相关性较强,随机性因素(耕作制度、施肥等)使土壤养分空

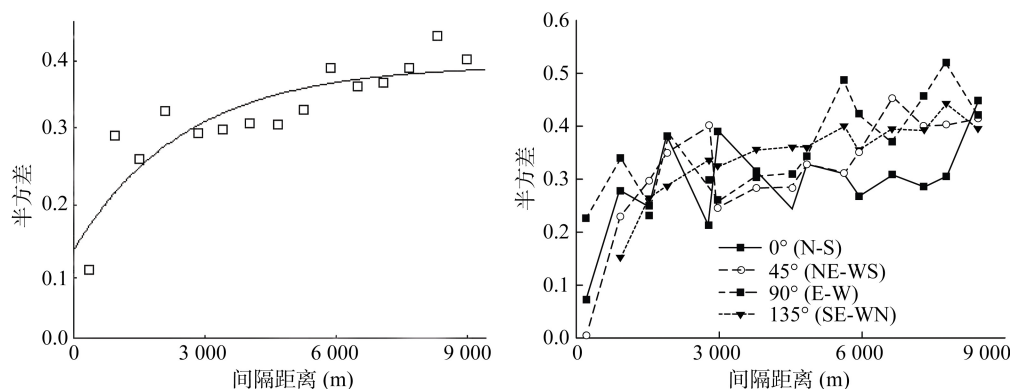


图2 土壤 pH 半方差函数模型  
Fig. 2 Semi-variance models of soil pH

间相关性减弱,朝着均一化方向发展<sup>[19]</sup>,研究区土壤 pH 块金效应值为 0.679,具有中等空间相关性,表明海沟河小流域土壤 pH 空间变异主要受成土类型、地形等结构性要素影响,受耕作制度、施肥措施等随机性要素影响较小,表明在一定程度上 pH 空间分布受人类活动影响所产生的不确定性较小。变程是半方差达到基台值的样本间距,也称空间最大相关有效距离,通常采样距离超过该范围,则没有空间相关性。从表 3 可以看出,研究区土壤 pH 的变程为 1 000 m,表明土壤 pH 存在较强的空间自相关性,该结果可作为指导该区域未来土壤 pH 空间分异规律时野外采样间隔距离的参考值。

研究区土地利用依次为林地、旱地、水田,各土地利用类型之间跨度较大,地形地貌比较复杂,为此本文对土壤 pH 的各向异性进行分析,并绘制 0°、45°、90° 和 135° 4 个方向的半方差函数图(图 2)。各项异性分析表明:研究区土壤 pH 在间隔距离 < 3 000 m 时,南-北(N-S)方向变异较大,东-西(E-W)方向变异较小;当间隔距离在 3 000 ~ 6 000 m 之间时,各方向变化整体上呈现各项同性;但是当间隔距离增大时,东西方向变异增大而南北方向变异较小,且各个方向变异差异有增大的趋势。这可能与研究区地形从东向西依次为高山丘陵、漫川漫岗、平地,而且土地利用依次为林地、旱田、水田,各土地利用类型之间跨度较大有关,在较小采样粒度下变异程度小于较大粒度采样的变异程度。该结果可以进一步指导该区域内未来采样点在各方向上的合理布设。

#### 2.4 土壤 pH 的地理加权回归克里格插值

由于研究区地形复杂,考虑到空间插值可能存在局部效应,本文采用地理加权回归克里格法对所有样点数据进行空间插值,克服了回归克里格法中回归系数可以随空间位置而变化的不足,并在相关研究中取

得了很好的效果<sup>[20]</sup>。在 SPSS 19.0 中对所选外部指标与 pH 进行相关性分析,提取参与回归分析的指标(表 2),该过程优先选取易于提取的地形指标因子,采用 OK 法对显著相关因子、截距系数以及残差分别插值,最后进行叠加得到土壤 pH 的空间分布(图 3)。

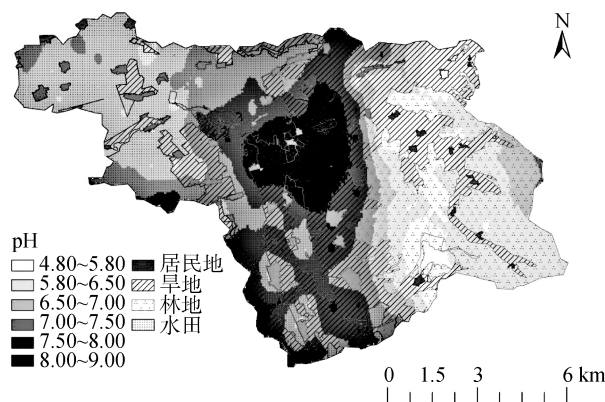


图3 研究区土壤 pH 空间分布图  
Fig. 3 Spatial distribution of soil pH

从图 3 可以看出:海沟河小流域土壤 pH 取值范围为 4.50 ~ 9.00。整体上流域土壤 pH 的高值区出现在中部区域,向东西两侧依次呈现“高-低”交替的带状趋势,高值与低值区之间过渡比较平缓,与土地利用方式在东西方向上的交替情形一致。旱地区域土壤 pH 整体偏高,在与林地过渡地带达到最高值,说明旱地和林地过渡地带是该区域土壤相对容易盐碱化的区域,这可能与土壤侵蚀有关。林地和旱地过渡区域坡度较大,每年 6—8 月份集中降雨过程中容易发生侵蚀<sup>[21]</sup>,侵蚀严重的区域土壤相对贫瘠,土壤质地相对较差,作物长势较差,水土保持能力较差,使其抵抗侵蚀能力更弱,恶性循环,导致土壤 pH 高。根据高海峰等<sup>[3]</sup>研究结果,土壤 pH 与含水量呈显著负相关。西部地区土壤 pH 为 6.5 ~ 7.5,与中部旱地

相比,西部地区地势平坦且土壤含水量较高,因此西部区域土壤 pH 较低。土壤 pH 最低值出现在东部林地区域,这可能是由于林地覆盖较好,侵蚀量相对较少,这是因为林地土壤表层聚集了大量的枯枝落叶,枯枝落叶在微生物的作用下发生分解,此过程向表层土壤释放各种有机酸,显著降低了表层土壤的 pH<sup>[23-24]</sup>;另外,林地土壤腐殖质含量高,其中的腐

殖酸等也能使土壤 pH 有较大幅度的降低,这与魏孝荣等<sup>[13]</sup>的研究结果相同。

## 2.5 土壤 pH 全局空间自相关特征分析

通过 GS+9.0 软件计算研究区土壤 pH 各向同性(图 4A)及各项异性(图 4B) 条件下的全局空间自相关 Moran's I 系数,  $Z(I)$  值为 8.6,通过  $Z(I)$  值检验( $P = 0.05$ ),表明研究区土壤 pH 存在强烈的全局空间自相关性。

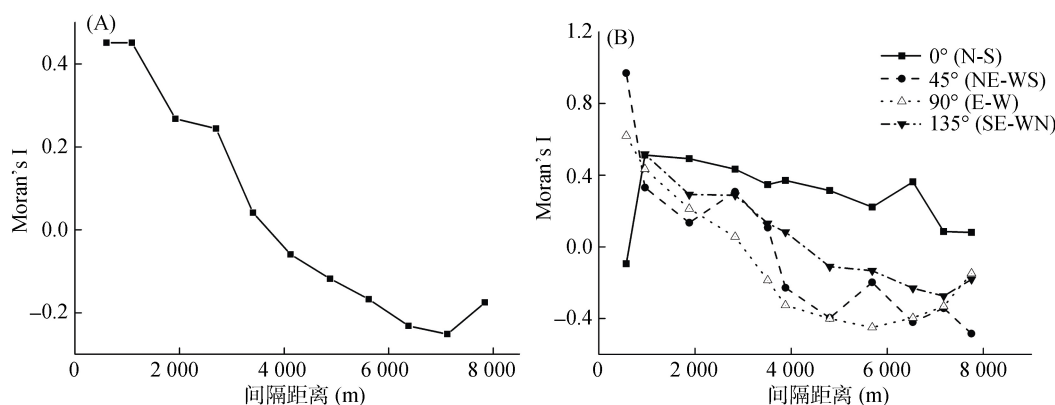


图 4 土壤 pH 各向同性(A)和各向异性(B)条件下全局自相关系数  
Fig. 4 Global autocorrelation coefficients of soil pH in isotropy (A) and anisotropy (B)

在各项同性下(图 4A),土壤 pH 存在较强的自相关性,且随着间隔距离的增加自相关性呈现剧烈变化。当间隔距离 $<4\ 000$  m 时,pH 表现出正的空间自相关性,且间隔距离 $<2\ 000$  m 时表现出很强的正空间自相关性;当间隔距离 $>4\ 000$  m 时,pH 表现负空间自相关性,随着间隔距离的增加(间隔距离 $>5\ 800$  m),逐步表现出较强的负的空间自相关性;在间隔距离 $>7\ 500$  m 后,pH 空间自相关性表现为小幅度回升态势。

在各向异性条件下(图 4B),流域内土壤 pH 也表现出较为复杂的自相关性,在  $0^\circ$ (N-S)方向上,Moran's I 变化比较复杂,在间隔距离 $<1\ 000$  m 时,由弱的负自相关逐步演变为强烈的正的空间自相关,然后随着间隔距离的增加,逐渐表现为较强的正自相关性,这可能与研究区南北方向上地形变化小且土地利用类型较为一致有关;在  $45^\circ$ (NE-WS)方向上,Moran's I 的变化趋势与各向同性条件下的变化趋势较为一致,均表现为 Moran's I 随间隔距离的增加由正相关变为负相关,但在局部上变化更为明显;在  $90^\circ$ (E-W)方向上,Moran's I 变化较为复杂,随着间隔距离增加,由强正相关性迅速向负相关性变化,当间隔距离 $>6\ 000$  m 时,空间自相关性逐渐减弱,这可能与东西方向土地利用方式及植被类型差异较大有关;在  $135^\circ$ (SE-WN)方向上,Moran's I 的变化趋势整体与各项同性一致。以上自相关特征的出现与研

究区内不同尺度和不同方向上的土地利用及区域化耕作制度的差异性有着密切关系,其具体的影响过程有待进一步验证。总之,海沟河小流域耕地表层土壤 pH 在不同方向上的 Moran's I 变化趋势相近,但在局部范围内存在较大差异,这对后期指导该区域农业生产具有十分重要的意义。

## 2.6 土壤 pH 局部空间自相关特征分析

通过局部空间自相关分析,绘制了研究区土壤 pH 的局部 Moran's I 散点图(图 5),揭示研究区不同土壤样点 pH 空间自相关特征的分布格局。结果表明:海沟河小流域土壤 pH 局部自相关系数为 0.4374,说明土壤 pH 在空间分布上存在较强的正相关性。从局部 Moran's I 散点图可以看出样点主要分布在第一和第三象限,呈现高-高和低-低集中格局,即土壤 pH 高值样点比较集中,且形成高值与高值高度自相关的趋势,同时,土壤 pH 低值样点也比较集中,且形成低值与低值高度自相关的趋势。此外,相当一部分样点处于第二象限,形成低-高型区域,即 pH 较低的样点被 pH 高的样点所包围,空间上形成中间低或者低值零星分布于高值区的格局。综观以上分析可以得出海沟河小流域土壤 pH 呈现高值集聚与低值集聚并存的格局,同时,在高低值混合分布情形中,以低值零星出现、高值呈现较大面积分布的情形较多。

基于局部 Moran's I 散点图,进一步对局部 Moran's I 系数进行显著性检验,并在研究区范围内进



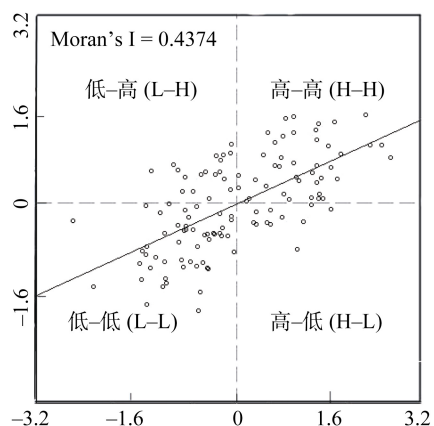


图5 土壤 pH 局部 Moran's I 系数散点图  
Fig. 5 Local Moran's I scatter plot of soil pH

行空间展布(图6)。从图6可以看出,海沟河小流域土壤 pH 局部 Moran's I 大部分呈现非显著性水平( $P = 0.05$ ),且达到显著性水平的以“高-高”型为主,主要分布在研究区中部,同时,“低-低”型也较多呈现显著性水平,主要分布在研究区北部山脚下和南部山脚下的小区域范围内。“高-低”型和“低-高”型的样点分布较为散乱,这样的结果可能与本研究的采样尺度有关,即在该采样尺度两种类型不具有空间集聚特征,具体情形有待基于不同采样尺度进行深入探讨。

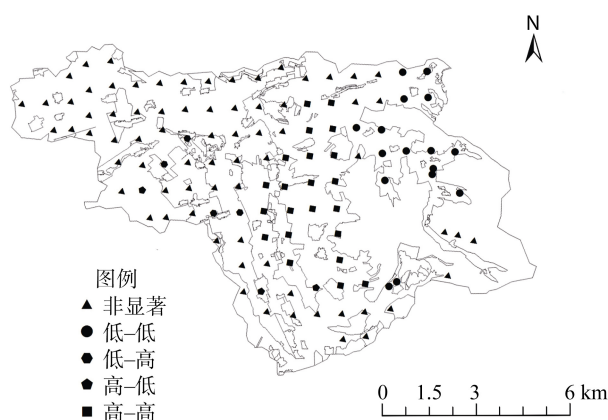


图6 土壤 pH 局部空间自相关特征分布图  
Fig. 6 Distribution of local spatial autocorrelation of soil pH

### 3 讨论

土壤 pH 的变化能够直接影响到土壤生态系统的物理、化学和生物过程,是土壤养分和重金属等污染物有效性和迁移性的重要限制性因素,全面分析土壤 pH 的空间分布格局,有助于评价和分析土壤酸碱性及土壤养分有效性<sup>[25-26]</sup>。土壤酸碱性的形成受自然和人为因素的影响,本研究表明,海沟河小流域土壤 pH 空间分布与海拔高度、到水体距离和到村庄距离具有显著相关性。海拔高的地方人类活动干扰小,多

森林灌丛等植被覆盖,温度和湿度适宜,落叶等腐殖质较多致使土壤呈酸性。河流水系一般位于区域低洼处,直接决定了土壤养分随土壤水分运移及区域水土流失的方向,经过长期的累积效应造成了距离河流水系较近的区域 pH 较低的状况。因此,通过引入地形等外部环境因子构造土壤 pH 空间分布的模拟模型,是一种提高土壤 pH 空间分布预测精度的有效方法。当前,随着农业生产向规模化和精准化方向发展,基于区域地形条件、农业资源要素自身结构特征等,划定不同农业生产区域,进而在农业生产过程中实现农业资源及基础设施的分区管理、合理投入以实现高效产出的目标,是农业现代化经营管理领域的重要内容。本研究结合地统计学和空间自相关分析方法,能够更加精确地反映研究区土壤 pH 空间分布特征及区域自相关情况,识别土壤 pH 空间集聚和孤立区域,参照土壤 pH 的“高-高”与“低-低”集聚区,科学精准施肥施药,因地制宜地挖掘区域最大的农业生产潜力。

采样时间点的不同或研究尺度的变化,可造成土壤 pH 时空变化差异,因此,虽然小尺度上研究土壤 pH 不具备普遍性,但对其空间结构关系特征展开研究在农业生产中有很强的指导作用。此外,采用地统计学与空间自相关相结合的方法对土壤养分、重金属等元素进行空间上集聚区域的识别,可为农业生产中土壤肥力的精准培育以及由于氮磷分布不合理引发的农业面源污染区的识别与控制提供科学依据。本研究只进行了一个时期的野外采样,未对人类活动、季节、降雨等因素的影响作深入分析,将来可以通过对研究区不同时期的采样数据进行时空上的实验分析,进一步验证自然状态下土壤 pH 空间格局的稳定性,并对空间格局的影响因素进行探讨。

### 4 结论

1) 海沟河小流域土壤 pH 范围为 4.98 ~ 9.02, 标准差为 0.62, 不同区域土壤 pH 差异较大, 空间变异程度低。半方差函数分析显示土壤 pH 变程为 1 000 m, 空间自相关性较强, 土壤 pH 的空间变异受人类活动(耕作制度、施肥措施、秸秆处理)等随机因素影响小, 受地形、成土母质等结构性要素的影响大, 东-西(E-W)方向变异程度占主导作用。

2) 地理加权克里格插值法能够有效提高土壤 pH 空间分布模拟精度, 插值结果表明海沟河小流域内土壤 pH 高值区集中在中部旱田区域, 低值区出现在西部水田及东部的林地区域。高值与低值区之间过渡比较平缓, 向西依次呈现“高-低”交替的带状分布趋

势,与土地利用方式在东西方向上的交替情形相近。

3) 全局自相关分析表明海沟河小流域土壤 pH 存在较强的正自相关性,且不同方向存在差异,随着距离的增大,土壤 pH 呈现负自相关特征,分布存在空间孤立。局部空间自相关性结合 Moran 散点图分析结果显示土壤 pH 空间分布主要为 H-H 型(高-高关联)和 L-L 型(低-低关联)两种类型,空间集聚特征明显,H-L 型(高-低关联)和 L-H 型(低-高关联)空间分布散乱。

#### 参考文献:

- [1] 雷国平,代路,宋戈. 黑龙江省典型黑土区土壤生态环境质量评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 243-248
- [2] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2292-2296
- [3] 高海峰,白军红,王庆改,等. 霍林河下游典型洪泛区湿地土壤 pH 值和土壤含水量分布特征[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 268-271
- [4] 郭熙,郭晓敏,谭雪明,等. 农田养分空间变异研究[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(1): 73-77
- [5] 王文艳,张丽萍,刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子[J]. 水土保持学报, 2012(5): 123-127
- [6] 刘璐,曾馥平,宋同清,等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667-1673
- [7] 张素梅,王宗明,张柏,等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 188-194
- [8] 虞娜,张玉龙,黄毅,等. 保护地不同灌溉方法表层土壤 pH 小尺度的空间变异[J]. 土壤, 2008, 40(5): 828-832
- [9] 张朝生,陶澍,袁贵平,等. 天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关研究[J]. 土壤学报, 1995, 30(1): 50-57
- [10] 霍霄妮,李红,孙丹峰,等. 北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29(6): 1339-1344
- [11] 白军红,邓伟,王庆改,等. 松嫩平原湿地环境问题及整治方略[J]. 湿地科学, 2008, 6(1): 1-6
- [12] 王充,于东升,张海东,等. 典型黑土区农田土壤碳库及其影响因子显著性变化特征研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 845-852
- [13] 魏孝荣,邵明安. 黄土沟壑区小流域土壤 pH 值的空间分布及条件模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 61-67
- [14] 马泉来,高凤杰,张志民,等. 我国东北黑土丘陵区小流域土壤有机质空间分布模拟[J]. 环境科学研究, 2016 (3): 382-390
- [15] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,等. 土地利用对土壤性质影响的区域差异研究[J]. 中国农业科学, 2007(8): 1697-1702
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 106-107
- [17] 韦仕川,熊昌盛,栾乔林,等. 基于耕地质量指数局部空间自相关的耕地保护分区[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 249-256
- [18] 李子良,王树涛,张利,等. 经济快速发展地区耕地生产能力空间格局[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 323-331
- [19] 李启权,王昌全,岳天祥,等. 基于 RBF 神经网络的土壤有机质空间变异研究方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 87-93
- [20] 史舟,李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
- [21] 崔明,蔡强国,范昊明. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(5): 29-34
- [22] 张学雷,陈杰,张甘霖. 海南岛不同地形上土壤性质的多样性分析[J]. 地理学报, 2003(6): 839-844
- [23] 苏松锦,刘金福,何中声,等. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682
- [24] 金海龙,白祥,满中龙,等. 新疆艾比湖湿地自然保护区土壤空间异质性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010(2): 150-157
- [25] 李庆逵. 我国土壤科学发展与展望[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 207-216
- [26] Kim D H, Shin Y H. Spatial autocorrelation potentially indicates the degree of changes in the predictive power of environmental factors for plant diversity[J]. Ecological Indicators, 2016, 60: 1130-1141

## Spatial Variability and Autocorrelation Analysis of pH in a Mollisol Tillage Area of Northeast China

GAO Fengjie<sup>1</sup>, JU Tienan<sup>1</sup>, WU Xiao<sup>1</sup>, WANG Yuyao<sup>1</sup>, LI Xinzhe<sup>1</sup>,  
FAN Ping<sup>1</sup>, LUAN Tian<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>2\*</sup>

(1 *College of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;*

2 *Research Academy of Environmental Sciences of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China*)

**Abstract:** This paper mainly discussed the spatial variation and distribution characteristics of soil pH in a mollisol watershed of northeast China by combining methods of classical statistics, with the Moran index model of global spatial autocorrelation and local indicators of spatial association and “3S” technology. The results showed that the mean value of soil pH was 6.72, the variation coefficient was 9.91%, and the variation range was 1 000 m, which had strong spatial autocorrelation, the spatial variability was influenced significantly by structural factors such as terrain and parent material, and it was relatively severe in the East–West direction (E–W). Soil pH was significantly correlated the terrain factors such as the altitude and so on. Geographical weighted kriging showed that high value of pH mainly distributed in dry field in the middle while the low value area distributed in the eastern woodland and the western paddy field, presenting a trend as high in the middle and low in the east and west, which conformed with the distribution pattern of paddy land–dry land–forest from west to east. The results of global autocorrelation analysis showed a strong positive autocorrelation characteristic of soil pH and obvious differences in different directions. With the increase of distance, soil pH showed a negative autocorrelation characteristic, presenting isolation in space. The local spatial autocorrelation mainly displayed an H–H (high–high correlation) and L–L (low–low correlation) types, indicating a coexistence pattern of high and low value agglomeration. The H–H type mainly distributed in the middle flat place, where surface soil moisture and its spatial autocorrelation were both high. The L–L type mainly distributed in the eastern mountain and western paddy field, where surface soil pH content was low.

**Key words:** Mollisol tillage area; Geostatistics; Soil pH; Spatial autocorrelation