

基于Moran's I 的菜地土壤属性空间分布格局分析

王强, 郑梦蕾, 叶治山, 杨善莲, 马友华

引用本文:

王强, 郑梦蕾, 叶治山, 等. 基于Moran's I 的菜地土壤属性空间分布格局分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2297–2306.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0324>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沈阳市新民设施菜地土壤重金属污染特征分析

郭畔, 宋雪英, 刘伟健, 李玉双, 魏建兵, 李秀颖, 夏思雨

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 835–844 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0883>

东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究

李想, 龙振华, 朱彦彦, 杨昶, 李明堂

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2239–2248 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0315>

西安市郊不同年限设施菜地土壤Cd和Pb形态分析与污染评价

郭军康, 赵瑾, 魏婷, 李艳萍, 吕欣, 任倩, 王小红

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2570–2577 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0892>

不同年限设施菜地番茄细胞壁果胶Cd累积的研究

郭军康, 周冉, 任心豪, 魏婷, 徐慧芸, 李艳萍, 吕欣

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 45–51 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1007>

山东寿光设施菜地土壤-农产品邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征调查

郑顺安, 薛颖昊, 李晓华, 段青红, 高尚宾

农业环境科学学报. 2016, 35(3): 492–499 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.03.012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王强, 郑梦蕾, 叶治山, 等. 基于Moran's *I*的菜地土壤属性空间分布格局分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2297–2306.

WANG Qiang, ZHENG Meng-lei, YE Zhi-shan, et al. Analysis of spatial distribution pattern of vegetable soil properties based on Moran's *I* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2297–2306.



开放科学 OSID

基于Moran's *I*的菜地土壤属性空间分布格局分析

王强¹, 郑梦蕾¹, 叶治山¹, 杨善莲¹, 马友华^{2*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学新农村发展研究院, 合肥 230036)

摘要:为探讨时空尺度下露天菜地及设施菜地种植模式对土壤属性空间分布格局的影响,采用Moran's *I*空间分析方法,对安徽省肥东县2017年采集的375个表层土样数据、2016年的露天菜地数据及2019年的设施菜地数据之间的空间自相关性进行研究。结果表明:研究区内露天菜地种植时间越短,土壤全氮、速效钾的平均值越高,设施菜地种植时间越短,有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH 5种土壤属性平均值越高。除速效钾外,露天蔬菜的土壤有机质、全氮、有效磷、pH指标值均低于设施菜地。距离城镇越近,土壤有机质、全氮含量和pH越高。两种菜地分布密度与有机质、全氮空间分布呈高高空间正相关,与有效磷和速效钾呈低高空间负相关,与pH在土壤中呈高低空间负相关。研究结果表明,两种菜地土壤属性指标值因受到种植时间与城镇距离因素的影响而差异明显。因经济利益驱动,设施菜地种植时间较短但土壤养分累积较快。菜地分布密度对土壤属性空间分布格局影响明显,菜地种植与土壤酸化、养分累积具有一定的相关性。通过Moran's *I*空间分析,可实现对蔬菜生产区域的管理,为进一步分析土壤属性扩散演化机制提供参考。

关键词: Moran's *I*指数; 露天菜地; 设施菜地; 面源污染; 空间分布格局

中图分类号: S15; X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)10-2297-10 doi:10.11654/jaes.2020-0324

Analysis of spatial distribution pattern of vegetable soil properties based on Moran's *I*

WANG Qiang¹, ZHENG Meng-lei¹, YE Zhi-shan¹, YANG Shan-lian¹, MA You-hua^{2*}

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Institute for New Rural Development, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To explore the influence of open vegetable field and greenhouse vegetable field planting patterns on the spatial distribution pattern of soil properties at spatial and temporal scales, Moran's *I* spatial analysis method was used to study the spatial autocorrelation between 375 topsoil samples collected in 2017 in Feidong County from Anhui Province, open vegetable fields data from 2016, and greenhouse vegetable fields data in 2019. The results showed that the shorter the planting time of the open vegetable fields, the higher the average value of total nitrogen and available potassium. The shorter the planting time of greenhouse vegetable fields, the higher the value of organic matter, total nitrogen, available phosphorus, available potassium and pH. These index values of soil properties included the organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and pH of open vegetable fields in the study area and were lower than that of greenhouse vegetable fields, except for available potassium. The closer the distance to the town, the higher the soil organic matter, total nitrogen content, and pH; this showed a downward trend as the distance increased. The spatial density of the two vegetable fields was positively correlated with the spatial distribution of organic matter and total nitrogen, negatively correlated with the spatial distribution of available phosphorus and available potassium, and negatively correlated with the spatial distribution of pH in the soil. Based on these results, the soil property index values of the two vegetable fields can be identified as significantly different due to the influence of planting time and

收稿日期: 2020-03-23 录用日期: 2020-08-15

作者简介: 王强(1980—),男,安徽宿州人,博士,讲师,主要从事资源环境与信息技术应用研究。E-mail: 28104@ahau.edu.cn

*通信作者: 马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800402)

Project supported: National Key R&D Program of China(2018YFD0800402)

distance from the town. Driven by economic interests, the planting time of greenhouse vegetable fields is shorter but the soil nutrients accumulate faster. The distribution density of vegetable fields influences the spatial distribution pattern of soil properties. The planting of vegetable fields has a certain correlation with soil acidification and nutrient accumulation. Through Moran's I spatial analysis, the regionalized management of the vegetable production area can be realized, providing a basis for further analysis of the diffusion evolution mechanism of soil properties.

Keywords: Moran's I ; open vegetable field; greenhouse vegetable field; non-point source pollution; spatial distribution pattern

土壤养分累积迁移成为地表水和地下水的污染源,是全世界迫切解决的难题之一^[1]。农田面源污染中氮磷元素的迁移已导致我国大面积的湖泊和水库富营养化^[2],受到了普遍关注,一些学者利用多元统计、地统计方法进行定性或定量研究^[3]。一般认为自然来源和人为来源是农田面源污染的两大来源,前者指在成土过程中地质高背景值带来的富集作用,后者主要指农业生产及农村生活对土壤的作用^[4-7]。蔬菜在居民生活中必不可少,我国已是世界上最大的蔬菜生产和消费国,蔬菜播种面积和产量均占世界的40%以上^[8]。根据中国国家统计局数据及公开发表文献,我国蔬菜面积已达到1 998.1万 hm^2 ,设施蔬菜面积370万 hm^2 ^[9],蔬菜露天栽培面积1 628.1万 hm^2 。我国蔬菜集约化种植区大量施用肥料,导致土壤养分流失,引起土壤酸化、盐渍化和地下水污染,使土壤生物活性降低、分解能力下降,造成了严重的经济及环境问题^[10]。农业景观空间格局是农业面源污染的主要影响因素之一^[11],菜地面源污染风险空间分布格局识别与优化可为科学防范和治理农业面源污染提供决策依据^[12-14]。农业景观空间格局主要研究景观格局的时空变化特征^[15],通常采用遥感、地理信息科学和景观格局分析方法,运用经典回归模型和空间滞后模型研究农业景观格局及其组分的变化,如傅伯杰^[16]对黄土区农业景观空间格局的研究,Liu等^[17]运用多元线性回归模型量化不同土地利用对流域中氮、磷浓度贡献的研究。目前国内外学者在农业景观研究领域已有相关研究,但主要局限于农业景观格局变化及其环境效应、评价方法及其应用等方面^[18]。现代农业要求农田集约化、田面平整化、田块规则化,这促使农田斑块均质,导致土壤生态系统自调节功能减弱,为探明生态风险区来源,需要可追溯污染源的空间分析方法^[19]。局部二元莫兰指数分析可以帮助检测空间异常值或热点,是一种有效的区域变量探索性空间分析方法^[20]。一些学者研究了我国菜地土壤养分的时空变化和环境质量变化^[10]。Valente等^[21]使用局部二元莫兰指数进行空间相关性分析,结果表明土壤电导率

与土壤未利用磷呈强相关性,可作为精准农业管理的工具。Fu等^[22]研究发现,由于农民的集约化管理,土壤磷在农场周围和交通路线呈现高-高(High-High)空间分布。然而以往研究中缺乏时空尺度下菜地种植对土壤属性空间分布格局影响的研究,无法阐明研究区长时间尺度下菜地种植对土壤属性值变化的影响机制。因此,本研究以安徽省肥东县为实验区,通过面向对象分类方法获取2019年农业设施菜地空间分布位置,借助地面农业调查得到研究区全部菜地空间分布位置,结合采集的375个表层土壤样品,运用空间插值方法模拟土壤属性含量空间分布,运用莫兰指数对菜地空间密度分布是否影响土壤属性空间分布格局的问题进行研究,研究结果为农业土壤质量安全的管理与保护提供数据支撑,有助于基本农田的长期管理和保护。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

肥东县位于安徽省中部,是巢湖流域面源污染优先控制区^[23],面积22.12万 hm^2 ,耕地面积7.67万 hm^2 ,占总面积的35%,总人口110万,其中农业人口97万,是一个典型的农业大县。气候属北亚热带季风气候区,四季分明,雨量适中。菜地总面积6 159 hm^2 ,其中露天菜地5 092.52 hm^2 ,种植时间从1989年至2013年,设施菜地1 066.48 hm^2 ,种植时间从2003年至2019年。

1.2 数据来源及技术路线

1.2.1 蔬菜种植类型获取

遥感影像来源于2019年下载的Google earth 17级数据,主要根据设施的形态特征如长度、宽度、空间分布等,基于面向对象方法提取影像中的所有设施菜地。运用谷歌地球中的不同历史影像,对所有的设施菜地进行时空对比,将最早出现时间作为起始种植时间。设施菜地提取结果与2016年全县农业调查总菜地空间分布进行空间相交,分别得到不同种植年限露天菜地与设施蔬菜空间分布,如图1所示。

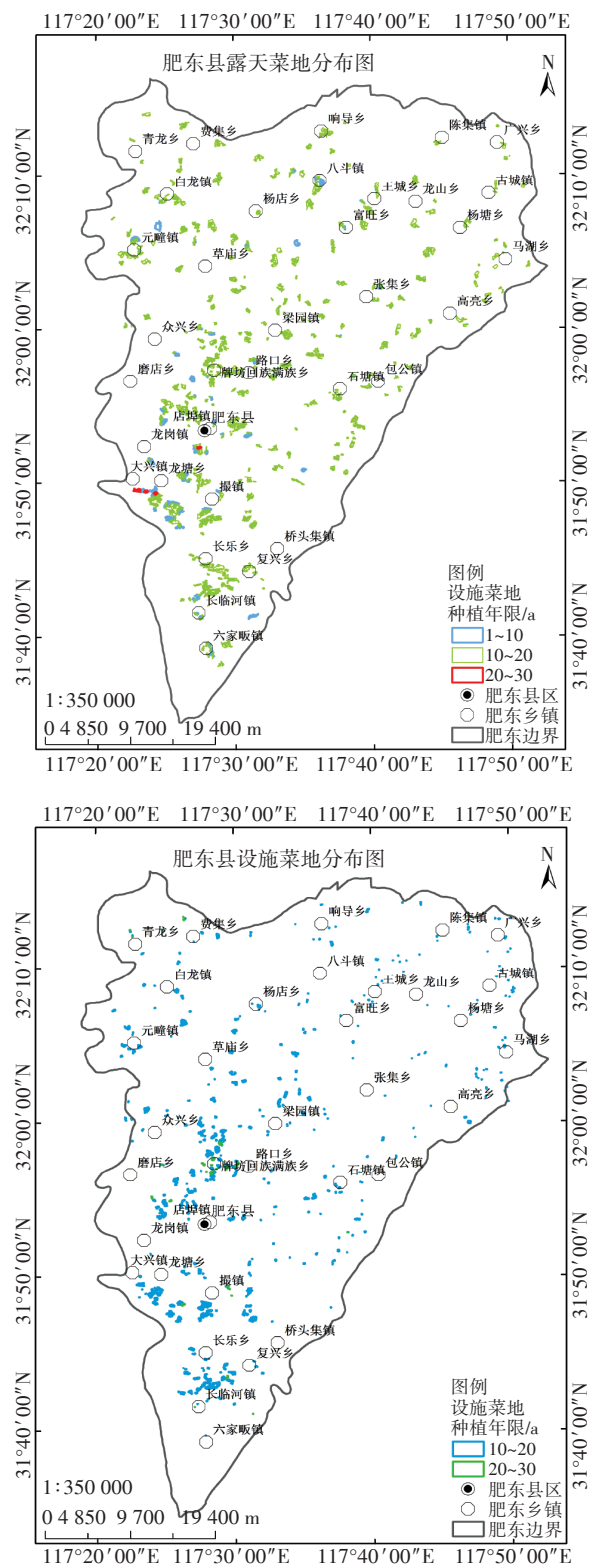


图1 两种菜地不同种植年限空间分布图

Figure 1 Spatial distribution of vegetable planting types

1.2.2 土壤采样与分析

基于成土母质、土壤类型划分采样单元并简单随机布点采样,于2017年7月至12月采集了375个0~

20 cm的表层土样,包含24个露天菜地采样点和10个设施菜地采样点,如图2所示,其分析方法依据测土配方施肥技术规范(2011年修订版)执行。

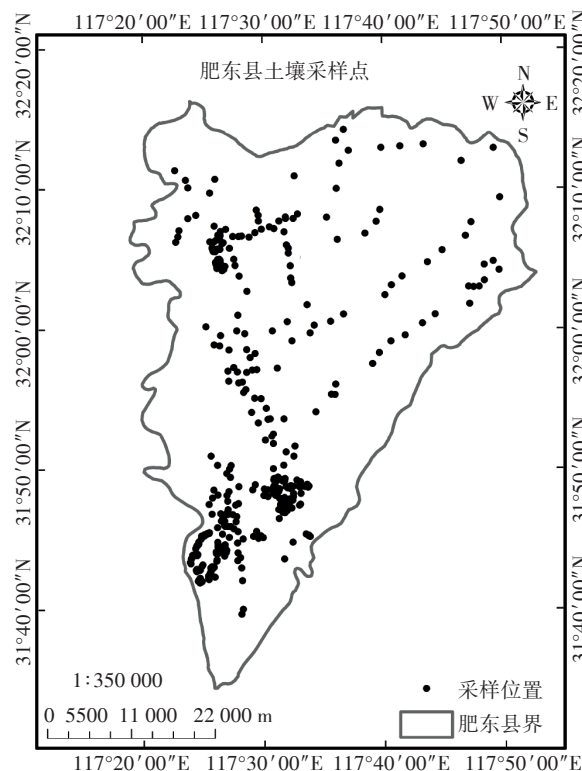


图2 采样点分布图

Figure 2 Distribution of sampling points

1.3 地统计插值和核密度模拟

本文采用ARCMAP 10.2软件平台进行土壤属性的地统计学插值和菜地密度的模拟,地统计是依据协方差函数对随机过程/随机场进行空间建模和预测(插值)的一种回归算法^[24]。核密度估计是对离散柱状图连续替换,创建平滑曲线的估值方法^[25],把空间配置和输入点数量计算的默认搜索半径作为带宽^[26],避免了稀疏数据集的空间异常值。

1.4 空间自相关分析

莫兰指数是计算空间自相关中最为经典的方法^[27],一般分为全局型(Global spatial autocorrelation)和区域型(Local spatial autocorrelation)两种^[28]。全局型Moran's I是基于统计学相关系数的共变量(Covariance)关系推算得来,共变量的大小程度即代表两组数的相关性大小。全局型Moran's I值的功能在于描述某现象的整体分布聚集状况,5%显著水平下, $Z(I) > 1.96$ 时,表示研究范围内某现象的分布有显著空间自相关性, $Z(I) < -1.96$ 时,表示研究范围内某现象的分布呈

现负的空间自相关性。全局型的Moran's I的公式如下:

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

式中:W_{ij}是研究范围内每一个空间单元*i*与*j*(*j*=1,2,3,⋯,*n*)区空间单元的空间相邻权重矩阵,以1表示*i*与*j*相邻,而以0表示*i*与*j*不相邻;*x_i*为一组变量的每项值,*x_j*为另一组变量的每项值, $\bar{x}$ 是其平均数。

局域型Moran's I是空间自相关局部检验统计量,用于识别空间聚类 and 空间异常值的位置。计算方法如下:

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

各变量定义与公式(1)类似。依照公式(2)计算出的Moran's I值介于-1到1之间,大于0为正相关,小于0为负相关。值越大空间分布相关性越大,即空间聚集分布明显,反之,值越小空间分布相关性越小,而当值趋于0时,即代表此时空间分布呈现随机分布的情形。采用GeoDa软件获取全局和局部莫兰指数空间自相关分类结果^[27]。

2 结果与分析

2.1 菜地土壤属性差异性分析

2.1.1 土壤属性特征分析

根据前期调研,研究区青菜有机肥用量为11.25 t·hm⁻²,小白菜有机肥用量为7.5 t·hm⁻²,用量最多的肥料品牌为河南莲鑫宝肥业有限公司的复合肥料(硫酸钾型,总养分≥14%,有机质≥45%)。土壤采样数据的分析结果如表1所示,土壤有效磷的变异系数最高,速效钾、全氮、有机质及pH紧随其后,分别达到29.34%、17.73%、14.07%、12.35%、4.67%。

如表2所示,距离城镇越近,有机质、全氮含量和pH相对越高,随着距离的增加整体呈下降趋势;有效磷含量和速效钾含量则随着距离的增加呈现先增加后下降的趋势,在2.0~2.5 km处出现最高值。

如表3所示,从均值可知随着种植年限的增加,露天菜地土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、pH变化明显,种植1~20 a的露天菜地除速效钾外其余土壤属性均低于设施菜地。设施菜地种植时间越短土壤属性指标值越高,而露天菜地种植时间越短全氮、速效钾、速效磷的指标值越高,其他属性指标值规律不明显,露天菜地pH在种植时间为20~30 a时,指标值反而较高。从标准差可知露天菜地土壤属性中,有机

表1 原始采样数据分析

Table 1 Analysis of raw sampling data

变量 Variables	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	中值 Median	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
有机质Organic matter/(g·kg ⁻¹)	16.23	28.34	22.16	22.67	2.74	0.25	2.33
全氮Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	0.85	1.68	1.23	1.21	0.17	0.46	3.38
有效磷Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	7.31	36.06	18.17	17.66	5.33	0.65	3.32
速效钾Available potassium/(mg·kg ⁻¹)	78.83	181.77	120.37	118.70	21.34	0.53	2.65
酸碱度pH	5.43	7.03	6.12	6.09	0.29	0.37	3.03

表2 不同城镇距离土壤属性指标平均值

Table 2 Average value of soil properties in different town distance

距城镇距离 Distance from town/km	个数 Number	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)	酸碱度 pH
0~0.5	71	22.89	1.29	16.30	114.45	6.21
0.5~1.0	76	22.59	1.26	17.26	113.94	6.22
1.0~1.5	90	23.00	1.28	17.82	120.62	6.14
1.5~2.0	56	22.09	1.19	19.85	120.41	6.06
2.0~2.5	40	21.07	1.10	21.29	132.36	6.05
>2.5	42	19.53	1.15	18.47	129.87	6.01

质、全氮、速效钾离散程度随种植时间的增加而降低,pH离散程度随种植时间的增加而提高,有效磷离散程度规律不明显;设施菜地土壤属性离散程度随种植年限的增加而降低。

2.1.2 菜地核密度空间分布

由图3可知,两种菜地都具有空间集聚特征,露天菜地集中区域分布较广,主要在乡镇和城市周边(图3左图)。设施菜地比露天菜地更加分散,主要集中于肥东县西南区域(图3右图)。

2.2 菜地土壤属性空间格局分析

如表4所示,全局Moran's I值表明各土壤属性均

有显著空间自相关性($P<0.01$),全局Moran's I值排序结果是速效钾>有机质>全氮>pH>有效磷。

二元局域性莫兰指数(Bivariate local Moran's I)的结果表明土壤属性和两种菜地均有显著空间自相关性($P<0.01$),与土壤有机质、全氮及有效磷均呈空间正相关,与速效钾和pH呈空间负相关(表5),除速效钾外,其余露天菜地的土壤属性相关性均大于设施菜地。

二元局域Moran's I可以定位双因素空间自相关性,可确定菜地分布对周边区域土壤属性的影响类型,具体分为4种:(1)High(土壤属性值)-High(菜地

表3 不同种植年限蔬菜种植类型土壤属性平均含量的统计

Table 3 Statistics of average soil properties content of different vegetable planting types and different planting years							
种植类型 Planting types	种植年限(a)/ 样品量 Planting years(a)/ sample size	面积 Area/hm ²	有机质Organic matter(mean±SD)/ (g·kg ⁻¹)	全氮Total nitrogen (mean±SD)/ (g·kg ⁻¹)	有效磷Available phosphorus(mean± SD)/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium(mean± SD)/(mg·kg ⁻¹)	酸碱度 pH(mean±SD)
露天菜地 Open vegetable fields	(1~10)/161	504.43	21.18±1.84	1.24±0.13	15.39±4.59	121.55±21.47	6.02±0.25
	(10~20)/2 203	4 554.61	20.57±1.68	1.23±0.12	14.27±6.13	120.26±19.9	5.98±0.26
	(20~30)/17	31.48	22.33±0.47	1.23±0.07	13.99±1.81	97.29±14.48	6.54±0.26
设施菜地 Greenhouse vegetable fields	(1~10)/1 822	1 017.15	21.50±1.79	1.28±0.15	15.76±5.33	116.94±17.5	6.10±0.31
	(10~20)/90	49.33	21.07±1.25	1.25±0.11	14.31±4.49	115.97±15.25	6.00±0.19

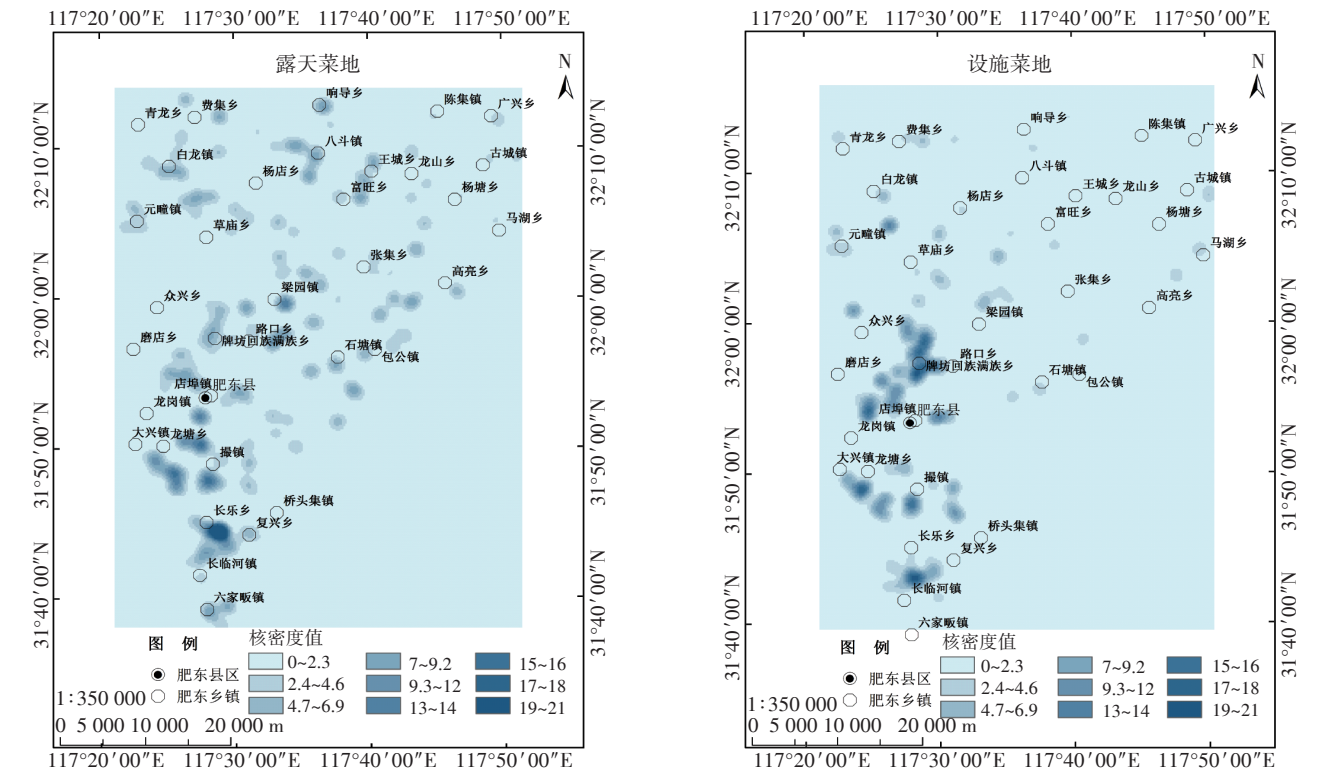


图3 露天菜地与设施菜地核密度分布

Figure 3 Kernel density distribution in open vegetable fields and greenhouse vegetable fields

表4 不同土壤属性全局 Moran's I 值
Table 4 Global Moran's I values of different soil nutrients

变量 Variables	全局 Moran's I 值 Global Moran's I values	Z	P
有机质 Organic matter	0.802 4	75.166 6	0.001
全氮 Total nitrogen	0.793 0	73.415 1	0.001
有效磷 Available phosphorus	0.758 4	69.291 2	0.001
速效钾 Available potassium	0.938 1	84.936 8	0.001
pH	0.765 5	74.398 4	0.001

核密度值)区域,代表菜地发展集中度高,土壤属性累积与菜地相关;(2)High(土壤属性值)-Low(菜地核密度值)区域,代表菜地发展集中度较低,土壤属性累积较为严重的区域,但与菜地种植无关;(3)Low(土壤属性值)-High(菜地核密度值)区域,代表菜地发展集中度高,无养分累积的区域;(4)Low(土壤属性值)-Low(菜地核密度值)区域,代表菜地产业发展集中度低,土壤属性累积较低的区域。如图4和图5所示,两种菜地对5种土壤属性中的空间分布影响相同,有机质和全氮在土壤中均呈现高高(High-High)空间正相关,有效磷和速效钾均呈现低高(Low-High)负相关,pH呈现高低(High-Low)负相关。

3 讨论

3.1 土壤属性特征分析

研究区土壤有效磷的变异系数最高,速效钾、全氮、有机质及pH紧随其后。土壤属性空间变异主要与人为生产或自然环境相关。因农户施肥习惯不同且磷在土壤中难以迁移造成其空间变异最高,钾因容易形成半径较小的离子且迁移性最强而空间变异位居其次,因土壤具有巨大的酸碱缓冲能力,因此土壤pH变异系数最低,而有机质与全氮迁移能力在速效钾与pH之间,这与前人研究结果相似^[29]。

各土壤属性与城镇距离的关系变化,源于土地

利用变化,肥东县最早发展蔬菜产业的区域一般位于近郊,随着城市扩张,蔬菜产业种植中心发生位移,有效磷含量和速效钾含量在2~2.5 km处出现最高值。

露天菜地相比设施菜地土壤酸化明显,这与前人研究结果相似^[30]。露天蔬菜种植历史相对较长,部分土壤酸化程度高于设施菜地,pH相对较低,但种植时间最长的露天菜地因距离城市较近,随着城市扩建所用建筑材料的影响,pH值反而较高。设施菜地种植时间越短土壤属性越高,因近10 a内新增菜地多为土地流转后的农业合作社,为追求经济效益,其施肥量远超过露天菜地,二者相差4~10倍,各土壤属性除速效钾外均高于露天菜地。露天菜地种植时间越短全氮、速效钾值越高,其他属性规律不明显,这与农户长期形成的相同施肥习惯有关,但露天菜地地表容易产生径流,具有较高的面源污染风险。研究区露天菜地超20 a种植区域集中在龙塘乡周围,近10~20 a的遍布肥东县各乡镇周围,由于设施种植是露天种植利润的3~4倍^[31],造成近10 a肥东县设施菜地兴起,露天菜地增长较慢。10 a以上设施菜地主要集中在牌坊回族满族乡内,是因为将设施菜地作为扶贫重点项目发展,而其他乡镇发展缓慢。近10 a设施菜地增长迅速,遍布研究区所有乡镇,但集中于其西南部,这与研究区南部大开发后人口集中有关,但到达六家畈镇后,因距巢湖太近,受到农业环保限制而戛然而止。

3.2 空间格局分析

局部 Moran's I 指数对空间离群值敏感,可以对土壤中氮、磷等元素划定区域,可为污染源的识别与控制提供依据^[24]。一些研究表明该方法可得到各土壤养分元素含量分布的“高高”、“低低”聚集区和“低高”、“高低”区域的具体位置,可以分别从乡镇尺度^[32]、行政村尺度^[33]对土壤属性进行管理。

本文与木合塔尔·艾买提等^[34]的研究结果不同,

表5 露天菜地不同土壤属性二元局域 Moran's I 值
Table 5 Bivariate local Moran's I values

变量 Variables	Bivariate Local Moran's I values		Z		P
	设施菜地 Greenhouse vegetable fields	露天菜地 Open vegetable fields	设施菜地 Greenhouse vegetable fields	露天菜地 Open vegetable fields	
有机质 Organic matter	0.075 1	0.104 1	10.014 9	13.654 4	0.001
全氮 Total nitrogen	0.133 4	0.177 0	17.390 6	23.047 6	0.001
有效磷 Available phosphorus	0.042 5	0.021 6	5.498 8	2.938 3	0.001
速效钾 Available potassium	-0.105 9	-0.102 1	-14.069 9	-13.255 4	0.001
pH	-0.021 1	-0.261 0	-2.774 7	-31.572 0	0.001

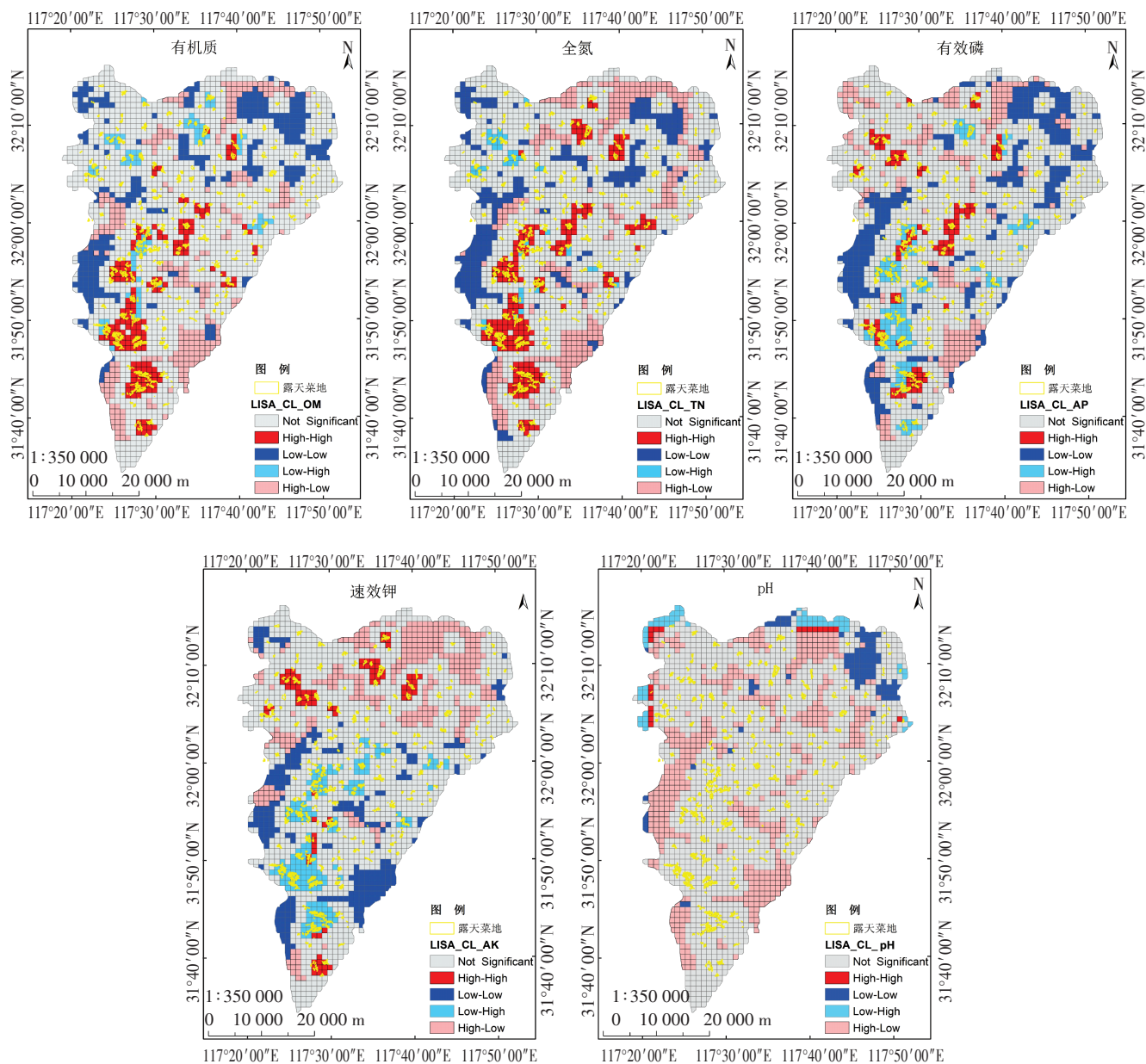


图4 露天菜地土壤属性二元局域Moran's I分布图

Figure 4 Bivariate local Moran's I distribution of soil nutrients in open vegetable fields

后者结果中土壤pH和缓效钾的含量呈空间正相关,全氮在空间上不具有相关性,因本文以1 km的网格作为评价单元,而后者以行政村为评价单元,导致空间尺度差异,从而造成研究结果不同。本文中设施菜地和露天菜地种植模式不同,对土壤属性空间分布的影响具有一定差异性,但种植模式差异无法解释土壤属性所有的空间变异性。其他学者的研究也说明土壤属性空间分布除受到地形、土壤类型等自然因素的影响之外,还受灌溉能力和施肥方式等人为因素的影响,且人为因素越来越强,越来越复杂^[35]。

4 结论

(1)露天蔬菜种植历史相对较长,距今10~20 a种植面积增长较快,主要集中于各乡镇周边,种植时间越短其全氮、速效钾的平均值越高,种植时间最长区域的pH受到城市开发的影响反而最高。

(2)近10 a设施菜地因利润较高而种植面积增长迅速,种植时间越短土壤属性指标值越高,除速效钾外其余4种属性值均高于露天菜地。距离城镇越近,土壤有机质、全氮和pH的指标值越高,随着距离的增加呈下降趋势。

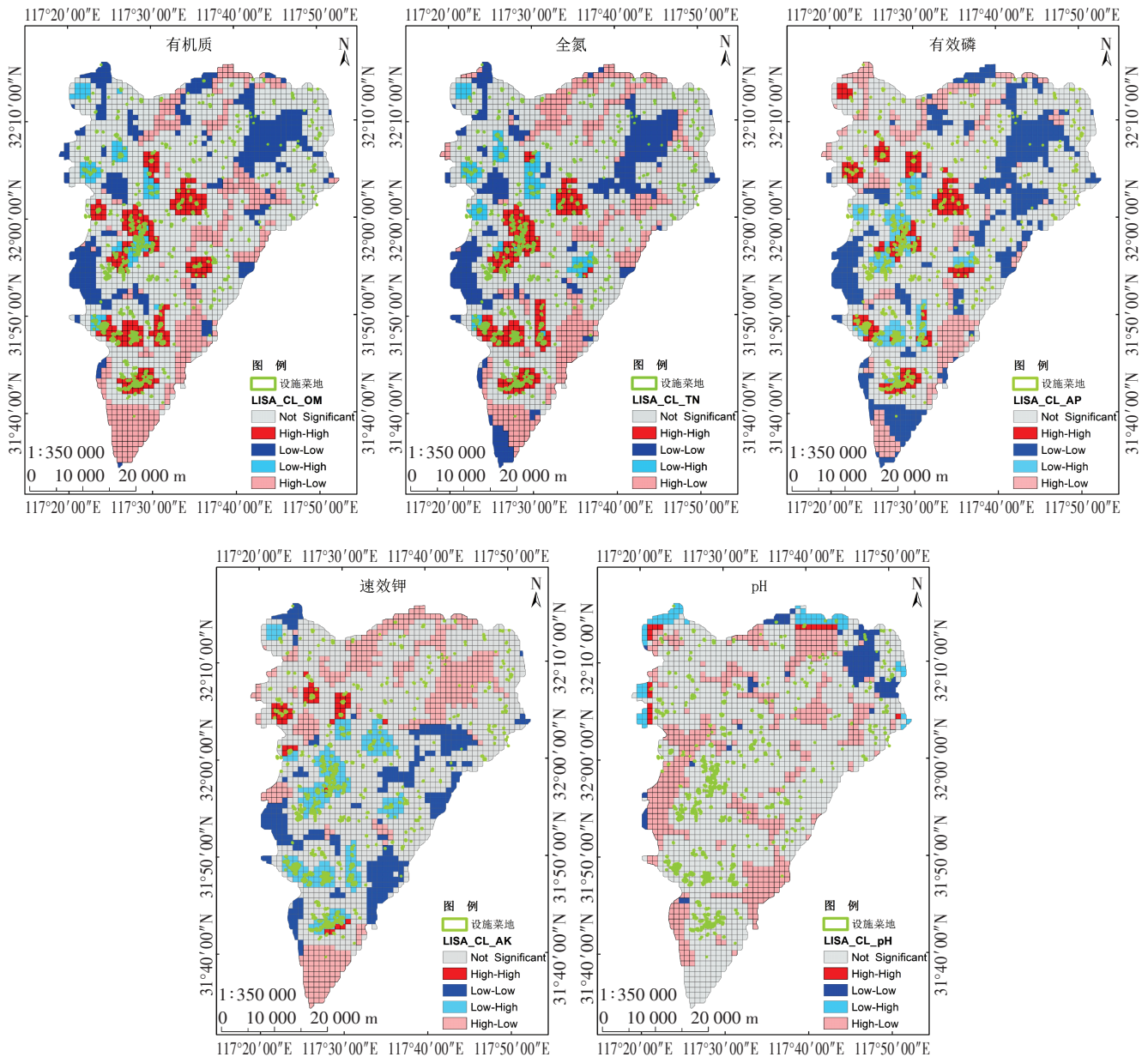


图5 设施菜地土壤属性二元局域Moran's I 分布图

Figure 5 Bivariate local Moran's I distribution of soil nutrients in greenhouse vegetable fields

(3)两种菜地种植与土壤酸化、土壤属性累积相关性显著,与有机质和全氮呈现高高空间正相关,与有效磷和速效钾呈现低高空间负相关,与pH呈高低空间负相关。

(4)通过Moran's I 空间分析方法,可实现菜地对周边土壤属性空间格局影响的精准表达,实现菜地种植对不同区域影响差异的空间可视化,可以为进一步分析土壤属性扩散演化机制提供参考,实现菜地不同区域及尺度的土壤属性分区管理,有助于定义更严格的农业种植管理规范,实现基本农田的长

期管理和保护。

参考文献:

- [1] 串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 等. 基于Web of Science数据库的土壤污染修复领域发展态势分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 12-20.
CHUAN Li-min, ZHENG Huai-guo, ZHAO Tong-ke, et al. Trends in research on contaminated soil remediation based on Web of Science database[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2016, 35(1): 12-20.
- [2] 封丽, 李崇明, 胡必琴, 等. 三峡水库正常蓄水后支流沉积物的污染特征[J]. 环境科学研究, 2016, 29(218): 42-48.

- FENG Li, LI Chong-ming, HU Bi-qin, et al. Analysis of pollution characteristics of surface sediments in Three Gorges Reservoir after normal impoundment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(3): 353-359.
- [3] 烟贯发, 张思冲, 齐少群, 等. 基于RS和GIS技术的松花江哈尔滨段流域面源污染特征分析[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(3): 91-98.
- YAN Guan-fa, ZHANG Si-chong, QI Shao-qun, et al. Characteristic analysis of surface source pollution in Harbin section of Songhua River based on RS and RIS technology[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(3): 91-98.
- [4] 张郁, 张峰, 苏明涛. 基于化肥污染的黑龙江垦区粮食生产灰水足迹研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(7): 31-35.
- ZHANG Yu, ZHANG Zheng, SU Ming-tao. Research on grey water footprint based on chemical fertilizer use in the grain production in Heilongjiang reclamation area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(7): 31-35.
- [5] 邱小琼, 王德全, 尹娟, 等. 宁夏农业面源污染及其影响因子解析[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 190-194.
- QIU Xiao-zong, WANG De-quan, YIN Juan, et al. Analysis of agriculture non-point source pollution and its influence factors in Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 190-194.
- [6] 洪燕婷, 仇蕾. 太湖流域农业面源污染防治措施研究分析[J]. *环境科技*, 2015, 28(3): 17-21.
- HONG Yan-ting, QIU Lei. Analysis of prevention and control measures on agricultural non-point source pollution in Taihu basin[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 28(3): 17-21.
- [7] 郑艳侠, 冯绍元, 姜娜, 等. 北京市北运河流域农业非点源污染类型及贡献率分析[J]. *中国农村水利水电*, 2010, 1(8): 30-33.
- ZHENG Yan-xia, FENG Shao-yuan, JIANG Na, et al. An analysis of agricultural non-point source pollution types and contribution rate of the Beiyunhe River basin in Beijing[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010, 1(8): 30-33.
- [8] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480-1493.
- HUANG Shao-wen, TANG Ji-wei, LI Chun-hua, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1480-1493.
- [9] 孙锦, 高洪波, 田婧, 等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42(4): 594-604.
- SUN Jin, GAO Hong-bo, TIAN Jing, et al. Development status and trends of protected horticulture in China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(4): 594-604.
- [10] 孟敏, 杨林生, 韦炳干, 等. 我国大棚农田土壤养分污染评价与空间分布特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(11): 1019-1026.
- MENG Min, YANG Lin-sheng, WEI Bing-gan, et al. Contamination assessment and spatial distribution of heavy metals in greenhouse soils in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(11): 1019-1026.
- [11] 刘芳, 沈珍瑶, 刘瑞民. 基于“源-汇”生态过程的长江上游农业非点源污染[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3271-3277.
- LIU Fang, SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min. The agricultural non-point sources pollution in the upper reaches of the Yangtze River based on source-sink ecological process[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3271-3277.
- [12] 孔佩儒, 陈利顶, 孙然好, 等. 海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化[J]. *生态学报*, 2018, 38(12): 4445-4453.
- KONG Pei-ru, CHEN Li-ding, SUN Ran-hao, et al. Identification and optimized simulation of non-point source pollution risk patterns in the Haihe River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4445-4453.
- [13] 王金亮, 陈成龙, 倪九派, 等. 小流域农业面源污染阻力评价及“源-汇”风险空间格局[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 216-224.
- WANG Jin-liang, CHEN Cheng-long, NI Jiu-pai, et al. Resistance evaluation and "source-sink" risk spatial pattern of agricultural non-point source pollution in small catchment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(10): 216-224.
- [14] Ristaino J B, Gumpertz M L. New frontiers in the study of dispersal and spatial analysis of epidemics caused by species in the genus *Phytophthora*[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2000, 38(1): 541-576.
- [15] 周心琴, 陈丽, 张小林. 近年我国乡村景观研究进展[J]. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(2): 77-81.
- ZHOU Xin-qin, CHEN Li, ZHANG Xiao-lin. Progress of rural landscape research in China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2005, 21(2): 77-81.
- [16] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析[J]. *生态学报*, 1995, 15(2): 113-120.
- FU Bo-jie. The spatial pattern analysis of agricultural landscape in the Loess area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(2): 113-120.
- [17] Liu J, Liu X L, Wang Y, et al. Landscape pattern at the class level regulates the stream water nitrogen and phosphorus levels in a Chinese subtropical agricultural catchment[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 295. doi:10.1016/j.agee.2020.106897.
- [18] 梁发超. 农业景观分类探讨及其应用——以北京市峪口镇为例[J]. *土壤*, 2017, 49(2): 408-413.
- LIANG Fa-chao. Classification methodology and application of agricultural landscape: A case study of Yukou town in Beijing[J]. *Soils*, 2017, 49(2): 408-413.
- [19] 付梅臣, 胡振琪, 吴淦国. 农田景观格局演变规律分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 54-58.
- FU Mei-chen, HU Zhen-qi, WU Gan-guo. Analysis of evolutionary law rule of farm land landscape[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(6): 54-58.
- [20] Huo X N, Zhang W W, Sun D F, et al. Spatial pattern analysis of heavy metals in Beijing agricultural soils based on spatial autocorrelation statistics[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8: 2074-2089.
- [21] Valente D S M, Queiroz D M D, Pinto F D A D C, et al. Spatial variability of apparent electrical conductivity and soil properties in a coffee production field[J]. *Engenharia Agrícola*, 2014, 34(6): 1224-1233.

- [22] Fu W, Zhao K, Zhang C, et al. Outlier identification of soil phosphorus and its implication for spatial structure modeling[J]. *Precision Agriculture*, 2015, 17(2): 121-135.
- [23] 张晓丽, 王夏晖, 路国彬. 合肥市农业面源污染防治优先区域识别[J]. *环境与可持续发展*, 2017, 42(3): 151-155.
- ZHANG Xiao-li, WANG Xia-hui, LU Guo-bin. Priority region identification of agricultural non-point source pollution prevention and control in Hefei[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017, 42(3): 151-155.
- [24] 陈冲, 胡克林, 张玲娥, 等. 冲积平原区土壤碳密度估算及其空间分布[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(7): 64-71.
- CHEN Chong, HU Ke-lin, ZHANG Ling-e, et al. Estimation and spatial distribution of soil organic carbon density in alluvial plain area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(7): 64-71.
- [25] 韩春萌, 刘慧平, 张洋华, 等. 基于核密度函数的多尺度北京市休闲农业空间分布分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 271-278.
- HAN Chun-meng, LIU Hui-ping, ZHANG Yang-hua, et al. Multi-scale spatial distribution analysis of leisure agriculture in Beijing based on kernel density estimation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 271-278.
- [26] Anderson T K. Kernel density estimation and K-means clustering to profile road accident hotspots[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2009, 41(3): 359-364.
- [27] Luc A, Syabri I, Kho Y. Geoda: An introduction to spatial data analysis[J]. *Geographical Analysis*, 2005, 38(1): 5-22.
- [28] Boots B, Tiefelsdorf M. Global and local spatial autocorrelation in bounded regular tessellations[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2000, 2(4): 319-348.
- [29] 张勇, 丁树文, 魏玉杰, 等. 崩岗洪积扇养分输移规律研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 216-222.
- ZHANG Yong, DING Shu-wen, WEI Yu-jie, et al. Transfer rules of soil nutrients in collapsing pluvial fan[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 216-222.
- [30] 钱晓雍. 塑料大棚设施菜地土壤次生盐渍化特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(5): 73-79.
- QIAN Xiao-yong. Characteristics of secondary salinization of vegetable soil in plastic film greenhouse[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 73-79.
- [31] 蒋和平, 王有年, 辛岭. 北京设施农业发展现状、问题与对策[J]. *北京农学院学报*, 2009, 24(3): 28-31.
- JIANG He-ping, WANG You-nian, XIN Ling. Current development, problem and strategy of facility agriculture in Beijing[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2009, 24(3): 28-31.
- [32] 冯定邦, 陈英, 张仁陟, 等. 安定区耕作层土壤养分含量的空间自相关分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2015, 50(6): 119-125, 131.
- FENG Ding-bang, CHEN Ying, ZHANG Ren-zhi, et al. Spatial autocorrelation analysis of nutrient content incultivated layer soils in Anding District of Dingxi City[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2015, 50(6): 119-125, 131.
- [33] 陈英, 冯定邦, 蔡立群, 等. 耕作层土壤养分含量的空间自相关分析——以秦安县郭嘉镇为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(1): 66-73, 107.
- CHEN Ying, FENG Ding-bang, CAI Li-qun, et al. Spatial autocorrelation analysis on soil nutrient contents of plough layer: A case from Guojia Town, Qinan County[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(1): 66-73, 107.
- [34] 木合塔尔·艾买提, 布美热木·克力木, 吴正祥. 鹤峰县中营镇耕作层土壤养分空间分布特征分析[J]. *喀什大学学报*, 2019, 40(3): 54-60.
- MUHTAR Amat, BUMARYAM Kirem, WU Zheng-xiang. Spatial distribution characteristics of plough layer soil nutrients in Zhongying Town, Hefeng County[J]. *Journal of Kashi University*, 2019, 40(3): 54-60.
- [35] 木合塔尔·艾买提, 肖鹏南, 周勇, 等. 山地丘陵交错地带耕层土壤pH和养分空间变异特征及影响因素分析[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(7): 1432-1441.
- MUHTAR Amat, XIAO Peng-nan, ZHOU Yong, et al. Spatial variability of cropland soil pH and nutrients and their affecting factors in mountainous hilly interlaced zone[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(7): 1432-1441.