

DOI: 10.5846/stxb202004090848

杨佳, 于志军, 王参, 王敏, 沈若雯, 刘敬泽. 雄安新区不同土地利用方式土壤性状的空间分布特征——以容城县为例. 生态学报, 2021, 41(17): 6764-6772.

Yang J, Yu Z J, Wang C, Wang M, Shen R W, Liu J Z. Spatial distribution features of soil properties from Xiong'an New Area: A case study of Rongcheng County. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6764-6772.

雄安新区不同土地利用方式土壤性状的空间分布特征 ——以容城县为例

杨 佳, 于志军, 王 参, 王 敏, 沈若雯, 刘敬泽*

河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050024

摘要:为阐明雄安新区不同土地利用方式下土壤性状的空间分布特征,采用网格法和随机取样法实地采集雄安新区—容城县表层土壤样品(0—20 cm) 133 份,运用地统计学和 ArcGIS 相关技术,对 4 种不同土地利用方式下的土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、电导率(EC)、土壤含盐量(SS)、含水量(WC)、pH 值、机械组成和空间分布特征进行了研究。结果表明,容城县土壤属轻壤土,pH 中性,土壤表层 SOM、TN、TP 和 TK 含量均处于中等水平。不同土地利用方式下,除 TK 含量无差异外,其他所有理化性状差异显著($P < 0.01$)。土壤 pH 值(内陆滩涂>林地>耕地>公园与绿地);SOM 含量(耕地>公园与绿地>林地>内陆滩涂);TN 含量(耕地≈公园与绿地>林地>内陆滩涂);TP 含量(耕地>公园与绿地>内陆滩涂>林地);SS(内陆滩涂>耕地>林地>公园与绿地);WC(内陆滩涂>公园与绿地>林地>耕地);EC(内陆滩涂>耕地>公园与绿地>林地)。不同土地利用方式下土壤 pH 值属弱变异性,SOM、TN、TP、TK、WC 和 EC 均为中等变异,SS 属高变异性。研究区土壤 SOM、TN 和 TP 含量呈显著正相关($P < 0.01$),经空间插值分析,SOM、TN 和 TP 空间分布状况类似,均表现为东部偏少,西部稍丰。WC、EC 和 SS 呈显著正相关($P < 0.01$),空间分布均呈斑块状。容城县表层土壤各性状指标均有趋势效应,且中部变化相对南北变化明显。上述研究结果明确了雄安新区土壤理化指标现状和土壤养分空间分布格局,为新区土地利用和生态建设提供科学支撑。

关键词:土壤性状;空间分布;土地利用类型;雄安新区;容城县

Spatial distribution features of soil properties from Xiong'an New Area: A case study of Rongcheng County

YANG Jia, YU Zhijun, WANG Can, WANG Min, SHEN Ruowen, LIU Jingze*

College of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

Abstract: In order to clarify the spatial distribution characteristics of soil properties under different land use patterns, 133 topsoil samples (0—20 cm) were collected from Rongcheng County in Xiong'an New Area by grid method and random sampling method. The soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), electrical conductivity (EC), salt salinity (SS), water content (WC), pH value, and soil mechanical composition under four different land use patterns as well as their spatial distribution features were analyzed by geostatistical methods and the tool of ArcGIS. The results showed that the soil in Rongcheng County belonged to light loam soil with neutral pH values. The contents of SOM, TN, TP and TK at the surface layer of soil were at the middle level. Under different land use patterns, except for the content of TK having no difference, the difference of other physical and chemical properties had reached very significant level ($P < 0.01$). The pH value of soil (inland tidal flat>woodland>farmland>Park and green land); SOM

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0506903,2018YFC0506900)

收稿日期:2020-04-09; 网络出版日期:2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujingze@hebtu.edu.cn

content (farmland>Park and green land>woodland>inland tidal flat); TN content (farmland $\approx$ Park and green land>woodland>inland tidal flat); TP content (farmland>Park and green land>inland tidal flat>woodland); SS (inland tidal flat>farmland>woodland>Park and green land); WC (inland tidal flat>Park and green land>woodland>farmland); EC (inland tidal flat>farmland>Park and green land>woodland). Under different land use patterns, pH value of the soil had weak variability, SOM, TN, TP, TK, WC and EC had medium variability, and SS had high variability. The SOM, TN, and TP content of the soil in the study area was positively correlated with each other ($P<0.01$). The spatial distribution patterns of SOM, TN and TP in the study area were similar according to the method of spatial interpolation, showing a feature of less in the east and more in the west. WC, EC and SS also showed a very significantly positive correlation ($P<0.01$), and the spatial distribution was patchy. The results showed that all physical and chemical properties of surface soil in Rongcheng County had trend effect, and the change in the middle was more obvious than that in the north and south. The above results clarified the current situation and the spatial distribution pattern of soil physical and chemical properties, and will provide scientific support for land use and ecological construction in Xiong'an New Area.

Key Words: soil properties; spatial distribution; land use types; Xiong'an New Area; Rongcheng County

2017年4月1日设立雄安新区,是党中央作出的重大历史性战略选择。雄安新区位于河北省保定市东北部,规划范围包括雄县、容城、安新三县及周边部分区域。打造优美生态环境,构建清新明亮的生态城市是建设雄安新区的重点任务之一^[1]。作为生态城市的重要组成部分,土壤是生物圈的基本结构单元,是调节生态系统的有力杠杆^[2]。

土壤性状是土壤肥力的判断标准和土壤资源的基本属性,土地利用方式对土壤性状有最直接和最深远的影响^[3-4]。研究表明,不同土地利用方式可改变土壤的理化性状和周围的环境,对土壤养分和土壤循环有及其重要的影响^[5-6]。土壤的有效管理和科学利用依赖于土壤理化指标的空间分布,对其研究有利于调整土地管理方法,发挥土壤的最大效益^[7-8]。土壤理化性状的空间变异十分复杂,随着地理信息系统的发展,将其与地统计学相结合研究土壤指标的空间分布已成为研究趋势^[9-10]。当前一些学者分别对陕甘晋黄土高原区^[11-12]、内蒙古农牧交错区^[13]、湖南旱地红壤区^[14]、贵州草海高原湿地^[15]和江西万安小流域^[16]等不同尺度不同用地方式进行了土壤指标差异性研究,土壤指标间相互影响,全氮(TN)与土壤有机质(SOM)积累具有高度同步性^[17],TN和全磷(TP)与施用氮磷复合肥相关^[10]。雄安新区建设面临复杂的资源、环境和生态安全问题,而土壤作为生态系统中的重要生态因子,有关雄安新区土壤的基本状况尚不明确,掌握雄安新区土壤理化特性及不同土地利用方式下土壤养分的空间分布特征对雄安新区土地利用和生态建设具有重要意义。

本研究以雄安新区—容城县为研究区,采用网格法和随机取样法对容城县不同土地利用类型土壤进行取样,测定表层土壤TN、TP、全钾(TK)、SOM、电导率(EC)、土壤含盐量(SS)、含水量(WC)、pH和机械组成。利用ArcGIS软件可视化土壤理化指标的空间变异规律和趋势变化,分析不同土地利用方式下土壤养分水平和空间分布特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

容城县为雄安新区建设起步区。地理坐标 38°57'04"—39°08'32" N、115°45'26"—116°04'02" E,东西长 26.85 km,南北长 21.38 km,总面积 314 km²。耕地面积 208 km²。全境西北略高,东南较低,海拔高(黄海) 7.5—19.5 m,土层深厚,土质良好^[18]。土壤类型主要以潮土、褐土为主。属暖温带大陆季风型气候,四季分明,冷暖干湿差异较大,年平均气温 11.9℃,年平均降雨量 522.9 mm,无霜期约 191 d。

1.2 土壤样品采集与分析

2019年8月在雄安新区—容城县采集土壤样品。考虑采样点布局的科学性、全面性,依据研究区总体特

征,利用 2 km 单位网格和随机取样相结合方法,对容城县全域进行统一布点。研究区以白沟引河、烧车淀、南拒马河、北瀑河和藻苣淀等周边滩地为典型内陆滩涂采样区,千年秀林及区域人工林为林地采样区,容城县全域耕作用地为耕地采样区,新区中心绿地及城市公园为公园与绿地采样区,共设定 133 个土壤采样区,每个采样区建立三个 25 m×25 m 的单位取样面积。采用五点式采样法采集样地表层土壤(距地面 0—20 cm),分别于四角及中心点采集样品,等质量充分混匀 5 点采集样品作为该区域土样。对于所划定区域中存在特殊端元(如典型土地利用类型)的土壤样品进行额外单独采集。耕地、林地、公园与绿地和内陆滩涂分类标准参考 GB/T 21010—2017《土地利用现状分类》^[19]。不同类型土壤样品数量分别为 102、9、13、9 个,共采集 133 个样品(图 1)。样品去除碎石、砾石、干枯树枝和树根等杂质,自然风干至恒质量,分别过 2 mm 和 0.25 mm 土壤筛备用。

1.3 分析方法

参照农业行业标准《土壤检测 第 3 部分:土壤机械组成的测定》NY/T 1121.3—2006,将试样制成悬浮液测定表层土壤粒径大小及含量百分数;用 pH 计测定土壤溶液 pH 值;电导率仪测定土壤溶液电导率(EC 值),平行测定 7 次;土壤分析仪 COMBI 5000 测定土壤含盐量(SS);土壤样品在恒温干燥箱中以 105℃ 烘至恒量,由土壤质量变化计算土壤含水量(WC);全磷(TP)参考林业行业标准《森林土壤磷的测定》LY/T 1232—2015 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;全钾(TK)参考《森林土壤钾的测定》LY/T 1234—2015 NaOH 熔融—火焰光度法。采用硫酸—加速剂消解,凯氏法测定土壤全氮(TN)含量;土壤有机质(SOC)采用重铬酸钾外源加热法测定^[20]。

1.4 数据处理

SPSS 22.0 软件对数据进行整理和统计分析。K-S 法检验原始数据是否符合正态分布,如不符合则对其进行转换。单因素方差分析计算不同土地利用方式对土壤养分的影响,若数据方差不齐,则进行多重比较检验。同时,利用 Pearson 土壤养分间的指标进行相关性分析^[21]。用 ArcGIS 将研究区内 133 个样点点位图数字化,生成用于地统计学分析的样点分布图,然后将相应样点的土壤养分数据输入到计算机形成与样点地理坐标匹配的属性数据^[22]。土壤理化指标全局趋势特征运用 ArcGIS 软件的地统计分析模块。用反距离加权插值法(inverse distance weighted, IDW)作出土壤各养分的空间变异规律,展示各养分指标的平面分布效果。

IDW 主要通过对邻近区域每个采样点间的距离为权重进行加权平均^[23]。设平面上分布一系列离散点,已知其坐标和值为 $X_i, Y_i, Z_i, (i=1, 2, \dots, n)$, 根据周围离散点的值,通过距离加权值求 Z 点值,则

$$Z = \left[\sum_{i=1}^n Z_i / d_i^2 \right] / \left[\sum_{i=1}^n 1 / d_i^2 \right]$$

式中, $d_i^2 = (X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2$ 。

2 结果与分析

2.1 容城县土壤各指标及养分含量的特征分析

雄安新区—容城县 133 个样点中,土壤 TN、SOM 和 TK 服从正态分布,TP、WC、EC、SS 和 pH 经自然对数转换后服从正态分布(表 1)。根据全国第二次土壤普查标准^[24],对容城县土壤养分指标进行级别划分。研究区表层 SOM 平均含量处于四级(中下等级)水平,土壤 TN 平均含量处于三级(中上等级)水平,土壤 TP 平均含量处于四级(中下等级)水平,土壤 TK 平均含量处于四级(中下等级)水平。

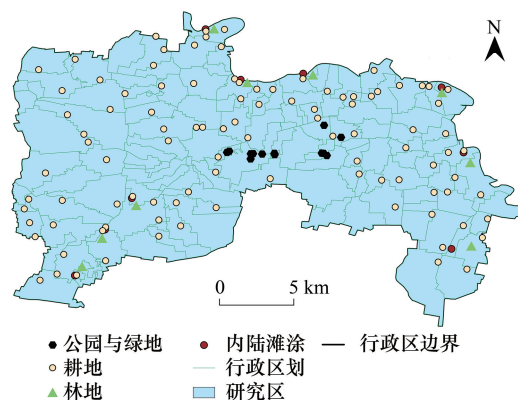


图 1 容城县采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling sites in Rongcheng County

表 1 容城县土壤性状统计特征

Table 1 Statistical characteristics of soil properties in Rongcheng County

指标 Index	样品数 Sample size	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 S.D.	变异系数 C.V./%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution type
有机质 Soil organic matter/(g/kg)	133	5.21	29.76	17.22	5.24	30.46	0.027	-0.194	正态
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	133	0.34	1.70	1.01	0.29	28.79	-0.142	-0.144	正态
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	133	0.26	1.46	0.58	0.16	27.14	1.508	6.451	对数正态
全钾 Total potassium/(g/kg)	133	9.13	21.41	14.49	1.84	12.70	0.512	1.536	正态
含水量 Water content/(g/kg)	133	4.17	34.76	10.27	5.26	51.25	2.358	6.416	对数正态
含盐量 Soil salinity/(g/L)	133	0.01	1.16	0.10	0.13	130.61	5.682	42.67	对数正态
电导率 Electrical conductivity/(ms/cm)	133	0.09	0.39	0.16	0.05	32.25	1.968	5.264	对数正态
pH	133	5.07	7.79	7.18	0.46	6.40	-1.556	4.330	对数正态

以 K-S 检验结果 sig>0.05,服从正态分布

2.2 不同土地利用方式下土壤理化指标的分布特征

2.2.1 土地利用方式对土壤 pH 和 SOM 含量的影响

雄安新区—容城县表层土壤 pH 值变幅为 5.07—7.79,平均值为 7.18(表 1)。不同用地类型土壤 pH 值存在显著差异($P<0.01$)(表 2),表现为内陆滩涂>林地>耕地>公园与绿地,公园与绿地土壤 pH 值显著小于其他 3 种用地类型。

表 2 不同土地利用类型土壤理化指标特征(平均值±标准差)

Table 2 Characteristics of soil physical and chemical indexes in different land use types (Mean±SD)

指标 Index	样地类型 Land use patterns			
	公园与绿地 Park and green land	耕地 Farmland	林地 Woodland	内陆滩涂 Inland tidal flat
pH	6.15±0.45B	7.28±0.30A	7.33±0.31A	7.45±0.20A
含盐量 SS/(g/L)	0.02±0.01C	0.09±0.05B	0.06±0.02B	0.42±0.36A
含水量 WC/(g/kg)	12.86±9.93B	8.93±2.68C	9.59±1.65BC	22.38±4.02A
电导率 EC/(ms/cm)	0.14±0.03B	0.15±0.04B	0.14±0.01B	0.24±0.11A
有机质 SOM/(g/kg)	16.79±4.21A	17.95±4.73A	16.10±5.08Aa	10.64±7.82Bb
全钾 TK/(g/kg)	15.18±0.90A	14.25±1.61A	15.28±2.62A	15.35±3.48A
全磷 TP/(g/kg)	0.58±0.19Ab	0.60±0.15Aa	0.44±0.11Bb	0.48±0.09b
全氮 TN/(g/kg)	1.05±0.28A	1.05±0.25A	1.02±0.22A	0.58±0.37B

同一行的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)

研究区表层 SOM 含量变幅为 5.21—29.76 g/kg,平均值为 17.22 g/kg。不同土地利用类型 SOM 含量差异显著($P<0.01$),耕地>公园与绿地>林地>内陆滩涂,耕地和公园与绿地 SOM 含量明显高于内陆滩涂,耕地、公园与绿地和林地间无显著差异。

2.2.2 土地利用方式对土壤 N、P、K 含量的影响

雄安新区—容城县表层土壤的 TN 含量变幅为 0.34—1.70 g/kg,平均值为 1.01 g/kg。不同土地利用类型土壤 TN 含量差异显著($P<0.01$),耕地≈公园与绿地>林地>内陆滩涂,其中耕地、公园与绿地和林地表层土壤 TN 含量相近。研究区土壤表层 TP 含量范围变幅为 0.26—1.46 g/kg,平均值为 0.58 g/kg。不同土地利用类型的 TP 差异显著($P<0.01$),耕地>公园与绿地>内陆滩涂>林地,林地土壤 TP 含量显著低于其他 3 种土地类型,耕地、公园与绿地之间土壤 TP 含量无显著差异。容城地区公园与绿地、耕地、林地、内陆滩涂土壤表层 TK 平均含量分别为 15.18、14.25、15.28 和 15.35 g/kg(表 1),均达到四级水平且各用地类型无显著差异($P>0.05$)。

2.2.3 土地利用方式对土壤 WC、SS、EC 的影响

雄安新区—容城县土壤表层 SS 为内陆滩涂>耕地>林地>公园与绿地,内陆滩涂土壤 SS 与耕地、林地及公园与绿地存在显著差异($P<0.01$),而其他 3 种土地类型间无显著差异。表层土壤 WC 为内陆滩涂>公园与绿地>林地>耕地,内陆滩涂土壤 WC 明显高于其他 3 种土地利用类型,公园与绿地土壤 WC 显著高于耕地($P<0.01$),而林地与耕地和公园与绿地间无差异。容城地区内陆滩涂表层土壤 EC 极显著高于其他 3 种土地类型,耕地、林地、公园与绿地之间 EC 并无显著差异(表 2)。

2.3 不同土地利用方式下土壤理化指标的变异

将雄安新区—容城县表层土样的 8 项理化指标分别进行算术平均,作为研究区土壤性质的平均状况(表 1)。结果表明,容城县土壤各指标丰缺程度不一,差异较大(表 3)。SOM、TN、TP、TK、WC、SS、EC 和 pH 值的平均含量分别 17.22 g/kg、1.01 g/kg、0.58 g/kg、14.49 g/kg、10.27 g/kg、0.10 g/L、0.16 ms/cm、7.18。变异系数(C.V.)作为土壤特性空间变异的一个统计量,可区别不同土壤理化指标抵抗外界条件的敏感性。通常认为 $C.V. \leq 10\%$ 为弱变异性, $C.V.$ 在 10%—100% 为中等变异性, $C.V. \geq 100\%$ 为强变异性^[25]。根据这一标准,容城县 0—20 cm SS 属强变异性,表明研究区多数土壤 SS 受外界干扰比较显著。土壤中 SOM、TN、TP、TK、WC 和 EC 均属中等变异性,pH 的变异系数为 6.40%,空间变异性最小。

表 3 不同土地利用方式下土壤理化指标的变异系数

Table 3 Coefficient of variation of soil physical and chemical indexes under different land use patterns

土地类型 Land use patterns	变异系数(C.V./%)							pH
	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	含水量 WC	含盐量 SS	电导率 EC	
公园与绿地 Park and green land	25.07	26.67	32.76	5.93	77.22	50.00	21.43	7.32
耕地 Farmland	26.35	23.81	25.00	11.30	30.01	55.56	26.67	4.12
林地 Woodland	31.55	21.57	25.00	17.15	17.21	33.33	7.14	4.23
内陆滩涂 Inland tidal flat	73.50	63.79	18.75	22.67	17.96	85.71	52.38	2.68
合计 Total	30.46	28.79	27.14	12.70	51.25	130.61	32.25	6.40

2.4 不同土地利用方式土壤理化指标间的相关性

对雄安新区—容城县不同土地类型表层土壤理化指标进行相关分析(表 4)发现,研究区土壤 pH 值与 TN、TK 含量呈负相关,但与 SS 呈显著正相关($P<0.01$)。SOM、TN、TP 含量呈显著正相关($P<0.01$),SOM 和 TN 含量间的相关系数达到 0.872,表明容城地区内表层土壤 TN 与 SOM 的积累有高度同步性。TN 含量和 TP 含量呈显著正相关($P<0.01$),可能是因为人工在使用以氮为主的复合肥料时会混合一定量的磷。新区表层土壤 WC、SS 和 EC 呈显著正相关($P<0.01$)。SOM、TP 和 TN 含量均与 WC 呈负相关,TK 与 WC 呈显著正相关($P<0.05$)。

表 4 土壤理化指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of soil physical and chemical indexes

指标 Index	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	含水量 WC	含盐量 SS	电导率 EC
pH	0.019	-0.064	0.092	-0.043	0.157	0.629 **	-0.060
有机质 SOM		0.872 **	0.263 **	-0.144	-0.052	0.075	0.017
全氮 TN			0.289 **	-0.051	-0.086	-0.004	0.024
全磷 TP				0.099	-0.015	0.077	-0.118
全钾 TK					0.182 *	0.030	-0.059
含水量 WC						0.575 **	0.237 **
含盐量 SS							0.327 **

* * 表示 $P<0.01$ 水平上显著相关,* 表示 $P<0.05$ 水平上显著相关

2.5 土壤各指标区域趋势特征及空间分布

对雄安新区—容城县表层土壤 8 项指标数据进行全局趋势分析(图 2),研究区各性状指标值的含量多少作为散点图投影到 X,Z 平面和 Y,Z 平面上。X 轴表示正东方向,Y 轴表示正北方向,Z 轴表示实测值的大小,每个方向可用一个多项式来拟合,如拟合曲线为直线,说明无趋势效应;若为确定的曲线,则存在某种趋势效应^[26]。研究区表层土壤各指标理化特性均存在二阶趋势,土壤指标中部区域变化相对南北变化更为明显。

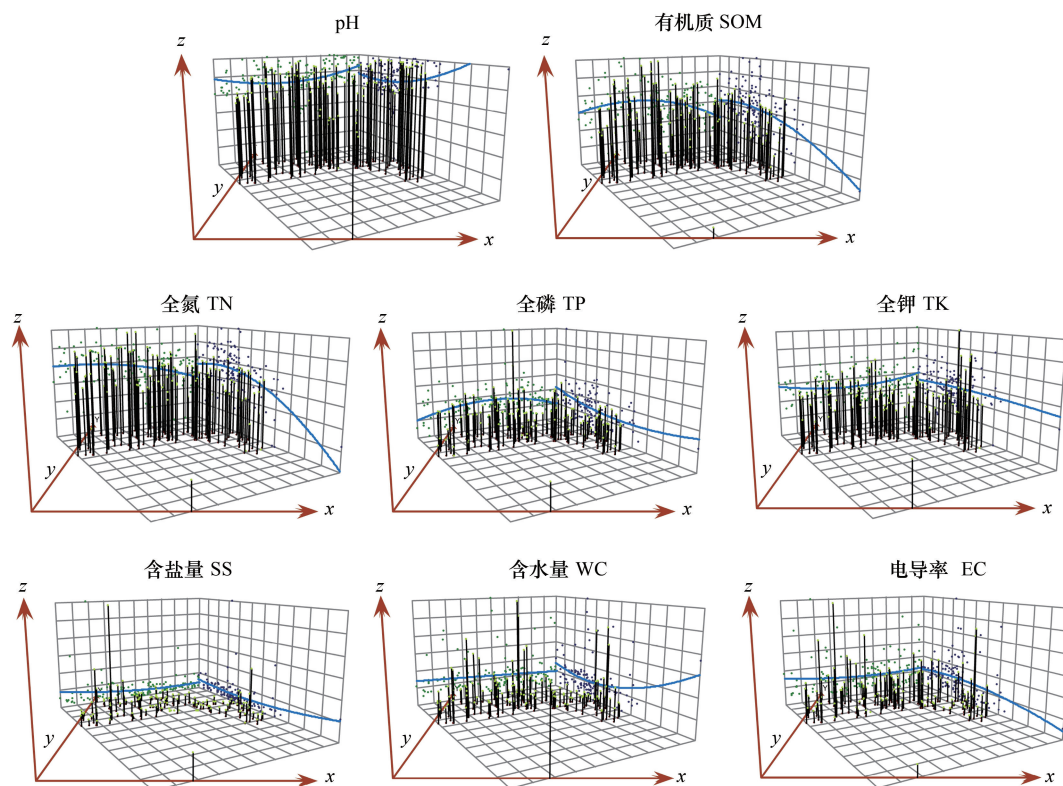


图 2 容城县土壤性状含量趋势

Fig.2 The trend of soil properties content in Rongcheng County

IDW 分析理化性状含量的空间分布(图 3)。雄安新区—容城地区土壤 pH 分布表现出“中间低,两端高”,中部土壤偏酸性,西部土壤为中性,东部土壤整体呈弱碱性。土壤 TN、SOM 和 TP 空间分布状况类似,具有极高的相关性,表现为东部偏少,西部稍丰,但 TK 含量空间分布较为均匀。容城县表层土壤 WC、SS 和 EC 空间分布相似,呈现斑块状特点。高值区主要分布在西南、正北和东南部,这与内陆滩涂在全域的分布位置相关。土壤机械组成是土壤一项重要的属性,直接关系着土壤的松紧程度、孔隙数量,从而影响着土壤通气、透水及土壤环境背景值、能量转化等性能,反映了土壤不同粒级的组成情况。测定容城地区 133 个土样质地并求其均值。粒径在 0.05—0.01 mm 的占总含量 31.65%,粒径在 0.01—0.005 mm 的占总含量 7.59%,粒径在 0.005—0.001 mm 的占总含量 9.56%,粒径<0.001 mm 的占总含量 10.73%。根据卡钦斯基制检测,土壤的机械组成平均粒径在<0.01 mm 占总含量 27.88%,物理性砂粒>0.01 mm 占 72.12%,因此,雄安新区—容城地区表层土属轻壤土。

3 讨论

土壤生态受多种因素影响,土壤特性是影响土壤生态的最重要因素之一^[27]。SOM 作为土壤肥力的重要指标,既可直接为作物提供养分,也可改善土壤的理化状况,在耕地质量、环境保护和农业可持续发展方面均

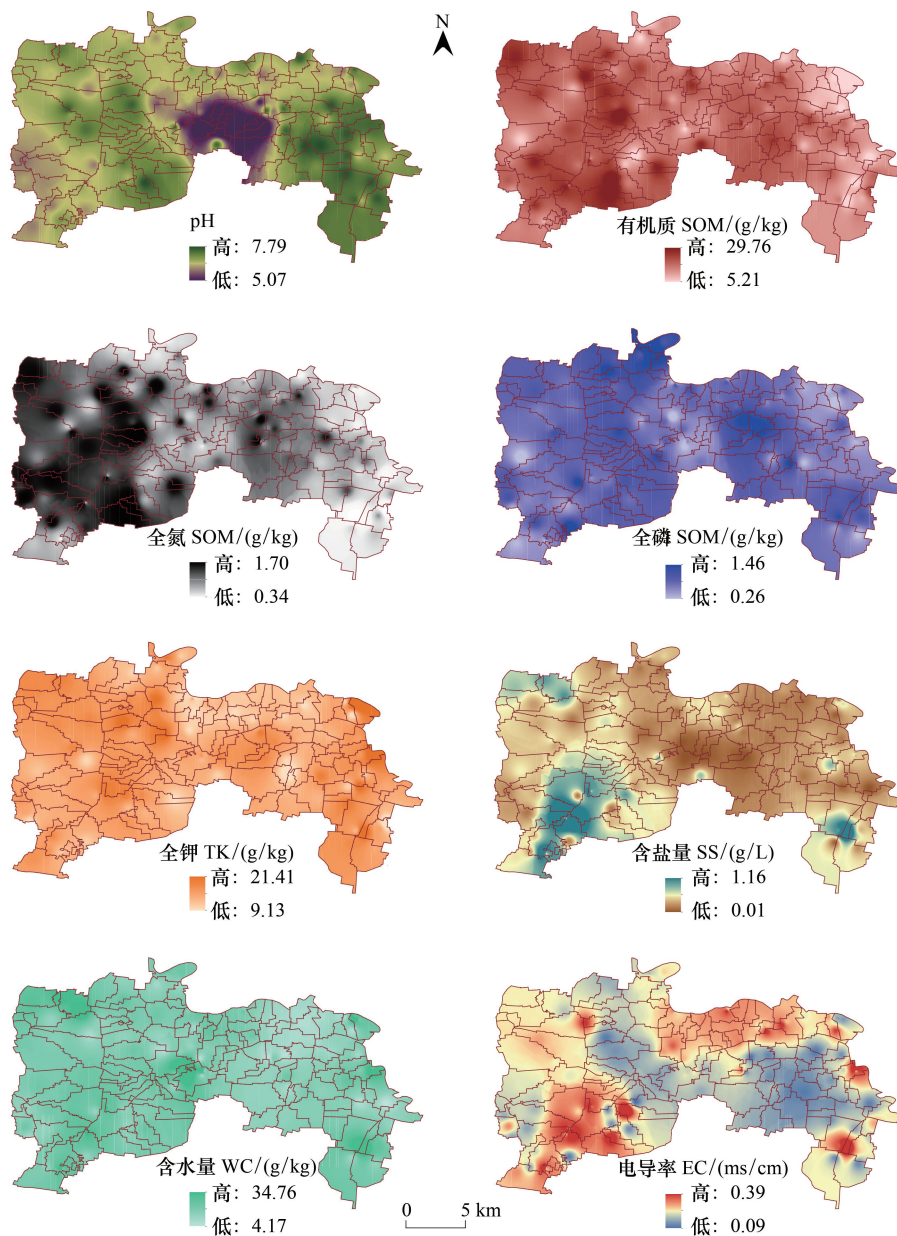


图3 容城县土壤性状含量分布图

Fig.3 Distribution of soil properties in Rongcheng County

有至关重要的作用^[28]。不同土地利用方式对 SOM 含量的影响很大。本研究中,不同土地利用方式下土壤 SOM 含量有显著差异($P<0.01$)。耕地 SOM 含量最高,与秦富仓等^[2]、姚喜军等^[19]的研究结果相似。土壤 SOM 含量受人为投入影响很大,本研究区耕地、公园与绿地受到不同程度的人工管理,不断培养土地肥力,改善土地 SOM 含量,而主要以人工林为主的林地,植被覆盖大,地表有较为丰度的凋落物残体,经分解能产生多种腐殖质,补充土壤碳库,提高 SOM 含量^[29-30]。本研究区的内陆滩涂大多为无人管理的滩地,无额外的外界有机质投入,且大部分滩地土壤呈碱性,有机质易被碱溶解而流失,因此有机质含量较低^[31]。土壤酸碱度是土壤的一项重要化学性质,直接影响土壤中各种养分元素的存在形式和对植物的有效性,因此了解土壤养分特征应首要了解土壤 pH 值情况^[32]。土壤 pH 值在不同土地利用方式上的表现结果与有机质含量基本相反。耕地、公园与绿地土壤 pH 相对较低,受经济或观赏效益的原因,人们为提高农作物产量、美化公园绿地、防治病虫害或自然灾害,大量使用化肥和农药,尤其是生理酸性肥料和半腐熟性化肥的使用,导致土壤呈现酸化趋

势,pH 值有所下降^[24]。

N 是土壤养分最重要的指标之一^[33]。土壤中 N 素含量受自然因素(气候、地型及植被类型)和农业措施(施肥、耕作)的影响,其含量一直处于动态变化中^[20]。4 种用地类型中 TN 含量存在显著差异($P<0.01$),其结果趋势与 SOM 含量趋势基本一致,是因为氮素损失机制与碳素损失过程相近,且土壤 N 的 95%源自于土壤 SOM^[34]。管理方式及外源 N 肥等物质的加入,使得耕地、公园绿地 TN 最高,无人管理的滩涂 TN 最低。P 是一种沉积性矿物,主要受土壤母质、气候和植被等影响^[35],土壤 P 元素是土壤肥力的启动因素,只有当土壤中的 P 素达到一定含量时,施用其他肥料才能达到增产效果^[25]。本研究发现,耕地的 TP 含量高于其他 3 种用地类型,与高君亮^[13]等的研究结果一致,这与耕作施肥和其他人工干扰活动等密切相关。林地 TP 含量显著低于其他 3 种土地类型,是由于人工林地植物比其他植物拥有更多的吸收 P 素的能力,致使林地土壤 TP 含量较低^[20]。

土壤 TK 是土壤中不同形态 K 素的总和,主要由母质释放,并被植株吸收利用。TK 含量在本研究区不同土地利用方式上差别不大,与 TK 含量受土壤特性影响较小有关,整体变化较弱^[36]。在不同土壤利用方式中,内陆滩涂的 WC、EC 和 SS 明显高于其它用地类型($P<0.01$)。被淀水冲刷过或距离淀水不远的河滩地,土壤含水量较充足,土壤电导率、盐离子含量较高。城市与绿地和耕地各土壤理化性状差别较小,其中 TN 含量两者平均值近似相等,是因为新区中公园与绿地的部分采样区域由原来耕地改建,地下养分积累时间较长而退耕年限较短,土壤部分性状与耕地相近。

土壤性状的影响因素多种多样,自然和人为影响都会对土层养分含量造成不同的变异。本研究区不同土地利用类型各理化指标差异显著,其中表层土壤 SS、WC 和 EC 相对于其他土壤养分空间变异性较高,表明土壤物理性状比养分性状更易受到外界影响,而养分性状中 TK 的变异系数最小,受外界干扰最小^[12]。土壤 pH 值是所有土壤理化性质中变异范围最小的,与土壤的缓冲能力和自我调节能力相关^[31]。对土壤养分间的 Pearson 相关系数分析发现(表 4),丰富的 SOM 含量与施加 N 肥含量具有高度同步性。TN 含量和 TP 含量呈显著正相关($P<0.01$),可能是人工在使用以 N 为主的复合肥时会混合一定量的 P^[10]。SOM、TN 和 TP 含量均与土壤 WC 呈负相关,表明土壤微环境水分越高,土壤 N、P 和 SOM 越易被淋失、分解。土壤 SS、WC 和 EC 三者呈正相关,可见,经水分淋溶分解后的 SOM、TN、TP 等可能在转化过程中产生大量的导电盐离子,增强土壤导电率,最终提高土壤盐分等含量。

全局趋势反应了土壤性状在空间区域上变化的主体特征,揭示了理化性状空间的总体规律。不同土地利用方式导致容城县土壤各指标均有趋势效应,且南北变化明显。经空间插值分析,容城县各土壤养分分布差异显著,因此在雄安新区—容城县的施肥过程中,应适量增添东部地区无机氮肥投入,减少西部投入情况,在提升研究区土壤肥力时,降低地表径流氮素流失量,有效减弱环境污染,改善新区生态质量。

掌握土壤理化指标的空间分布规律,精准施肥,是恢复植被生态的关键^[37]。土壤养分有连续改变和累积的特点,随着时间和环境的变化,土壤养分空间分布可能会出现更为复杂的规律性,因此将进行更为细致、深度、连续性的研究,这对区域生态的发展影响重大。研究区范围广阔,自然因素、社会经济因素等较为复杂,因此对土壤特性的空间变异和影响因素研究仍需深入。

4 结论

本文首次系统研究了雄安新区建设起步区—容城县不同土地利用方式下土壤性状的空间分布规律。研究区表层土壤以中性轻壤土为主,TN 含量处于中上等级,SOM、TP 和 TK 含量处于中下等级,单项养分因子均值分别达到全国第二次土壤普查的三级、四级、四级和四级水平。在相关政策、施肥用量、人工管理及植被覆盖等因素的共同作用下,容城县耕地、公园与绿地、林地和内陆滩涂 4 种土地利用类型各理化性状差异显著($P<0.01$)。不同用地类型中,耕地土壤养分状况最佳,土壤 TN、TP 和 SOM 含量最高。公园与绿地土壤性状与耕地相近,林地土壤除 TP 含量明显低于其他用地类型外,其他性状均处于中等水平,内陆滩涂土壤养分含

量最少但 pH 值、SS、WC 和 EC 最高。不同土地利用方式下 SS 属强变异, pH 值属弱变异, 其他指标均为中等变异。各指标相关性较强, 土壤 TN 和 SOM 含量积累高度同步。经空间插值和全局趋势分析作出容城县不同土地利用方式下表层土壤性状变化图, 为雄安新区土地利用和生态环境建设提供了重要的科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 中国雄安官网. 河北雄安新区规划纲要. (2018-04-21) [2020-04-01]. http://www.xiongan.gov.cn/2018-04/21/c_129855813.htm.
- [2] 秦富仓, 牛晓乐, 杨振奇, 马鑫, 任小同. 冒山小流域不同地形和土地利用下的土壤养分空间变异特征. 中国农业科技导报, 2020, 22(6): 138-148.
- [3] Cantarello E, Newton A C, Hill R A. Potential effects of future land-use change on regional carbon stocks in the UK. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(1): 40-52.
- [4] Potschin M. Land use and the state of the natural environment. *Land Use Policy*, 2009, 26(S1): S170-S177.
- [5] Nwaogu C, Joshua O O, Fashae O, Nwankwoala H. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by different land use in an Ultisol in Imo Watershed, southern Nigeria. *Chemistry and Ecology*, 2018, 34(9): 854-870.
- [6] Panday D, Ojha R B, Chalise D, Das S, Twanabasu B. Spatial variability of soil properties under different land use in the Dang district of Nepal. *Cogent Food & Agriculture*, 2019, 5(1): 1-9.
- [7] Wu C F, Huang J Y, Zhu H, Zhang L M, Minasny B, Marchant B P, McBratney A B. Spatial changes in soil chemical properties in an agricultural zone in southeastern China due to land consolidation. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 152-160.
- [8] 唐成, 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 杨钙仁, 梁志霞, 卢成阳. 喀斯特峰丛坡地不同土地利用方式下土壤 N、P 空间变异特征. 生态学报, 2013, 32(7): 1683-1689.
- [9] 董悦, 张永清, 刘彩彩. 晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性. 生态学报, 2018, 38(23): 8621-8629.
- [10] 朱永青, 崔云霞, 李伟迪, 徐璐, 夏梦茹, 曹炜琦. 太浦河流域不同用地方式下土壤 pH 值、有机质及氮磷含量特征分析. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2): 171-178.
- [11] 董云中, 王永亮, 张建杰, 张强, 杨治平. 晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量. 应用生态学报, 2014, 25(4): 955-960.
- [12] 杨静涵, 刘梦云, 张杰, 张萌萌, 曹润珊, 曹馨悦. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素. 自然资源学报, 2020, 35(3): 743-754.
- [13] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 党晓宏, 蒙仲举, 陈晓娜, 段娜. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(15): 5594-5602.
- [14] 李增强, 赵炳梓, 张佳宝. 土地利用和轮作方式对旱地红壤生化性质的影响. 土壤, 2014, 46(1): 53-59.
- [15] 张珍明, 林绍霞, 张清海, 郭媛, 林昌虎. 不同土地利用方式下草海高原湿地土壤碳、氮、磷分布特征. 水土保持学报, 2013, 27(6): 199-204.
- [16] 陈志超, 杨小林, 刘昌华. 万安流域不同土地利用类型土壤全磷时空分异特征. 土壤通报, 2014, 45(4): 857-862.
- [17] 秦川, 何丙辉, 蒋先军. 三峡库区不同土地利用方式下土壤养分含量特征研究. 草业学报, 2016, 25(9): 10-19.
- [18] 保定地方志. 容城县行政区划. (2017-05-23) [2020-12-20]. <http://www.bddfz.com/?m=show&cid=17&xid=19&id=1925>.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] 姚喜军, 徐进才, 刘静, 吴全, 徐艳红, 李有芳. 伊金霍洛旗不同土地利用方式下的土壤养分特征. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 111-116.
- [21] 张晗, 赵小敏, 欧阳真程, 郭熙, 匡丽花, 叶英聪. 江西省不同农田利用方式对土壤养分状况的影响. 水土保持研究, 2018, 25(6): 53-60.
- [22] 李明辉, 彭少麟, 申卫军, 林永标, 刘振乾. 丘塘景观土壤养分的空间变异. 生态学报, 2004, 24(9): 1839-1845.
- [23] 范玉洁, 余新晓, 张红霞, 宋美华. 降雨资料 Kriging 与 IDW 插值对比分析——以漓江流域为例. 水文, 2014, 34(6): 61-66.
- [24] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术. 北京: 农业出版社, 1992.
- [25] Kering M K, Butler T J, Biermacher J T, Mosali J, Guretzky J A. Effect of potassium and nitrogen fertilizer on switchgrass productivity and nutrient removal rates under two harvest systems on a low potassium soil. *Bioenergy Research*, 2013, 6(1): 329-335.
- [26] 刘国顺, 常栋, 叶协锋, 杨永峰, 殷英, 屈建康. 基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究. 生态学报, 2013, 33(8): 2586-2595.
- [27] 刘世梁, 傅伯杰. 景观生态学原理在土壤学中的应用. 水土保持学报, 2001, 15(3): 102-106.
- [28] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 孟远夺, 董燕, 李荣, 马义兵. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化. 土壤学报, 2017, 54(5): 1047-1056.
- [29] 尹炜, 朱悖, 雷俊山, 贾海燕, 曾祉祥. 丹江口水库典型消落区不同土地利用类型土壤养分分布. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1185-1191.
- [30] 朱菊兰, 刘森, 张阳, 宫继萍, 睢晋玲. 浑河太子河流域地形和土地利用对表层土壤养分空间变异的影响. 生态学报, 2016, 35(3): 621-629.
- [31] 马群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1834-1844.
- [32] 马朋, 李昌晓, 任庆水, 杨予静, 马骏. 模拟水淹-干旱胁迫对水杉幼树实生土壤营养元素含量的影响. 生态学报, 2015, 35(23): 7763-7773.
- [33] Fetene F M, Amara M Y. The effects of land use types and soil depth on soil properties of Agedit watershed, Northwest Ethiopia. *Ethiopian Journal of Science and Technology*, 2018, 11(1): 39-56.
- [34] Palviainen M, Finér L, Kurka A, Mannerkoski H, Piirainen S, Starr M. Release of potassium, calcium, iron and aluminium from Norway spruce, Scots pine and silver birch logging residues. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2): 123-136.
- [35] Kooijman A M, Jongejans J, Sevink J. Parent material effects on Mediterranean woodland ecosystems in NE Spain. *Catena*, 2005, 59(1): 55-68.
- [36] 刘文杰, 陈生云, 胡凤祖, 莎娜. 疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素. 生态学报, 2012, 32(17): 5429-5437.
- [37] 张永清, 苗果园. 生土施肥对黍子根系生长及生理生态效应的影响. 水土保持学报, 2006, 20(3): 158-161, 169-169.