

邛海盆地土壤氮素空间变异特征与影响因素研究^{*}

胡玉福 邓良基 肖海华 舒向阳 黄成毅 罗澜芳
(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要: 以西昌市邛海盆地为研究区域,随机均匀布点采集 386 个耕作层土壤样点,分析化验土壤理化性质,运用地统计学方法和 GIS 技术研究邛海盆地表层土壤氮素含量的空间变异特征,利用方差分析、缓冲区分析和回归分析定量分析区域内土壤氮素空间变异的影响因素。研究结果表明,研究区表层土壤全氮和速效氮含量分别为 (1.85 ± 0.51) g/kg 和 (138.5 ± 47.7) mg/kg,属较丰富水平,变异系数分别为 27.52% 和 32.24%,属中等差异强度;土壤全氮和速效氮具有中等程度的空间相关性,空间变异均以随机变异为主,具有各向异性特征,在西北-东南方向上空间变异相对剧烈;研究区土壤全氮和速效氮含量总体上呈条带状或斑块状分布特征,高值区主要位于西昌市的东南郊区,并以此高值中心向南、向东和向北 3 个方向逐步递减,低值区主要出现在邛海北面近湖岸地带。影响因素分析结果表明,土地利用方式、土壤母质、土壤质地、土壤 pH 值、城镇、河流、邛海湖对土壤全氮和速效氮空间变异具有显著影响,而道路对土壤氮素空间变异影响不显著。

关键词: 土壤氮素 地统计学 空间变异 GIS 缓冲区分析

中图分类号: S159 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0132-09

Spatial Variability of Soil Nitrogen and Its Influential Factors in Qionghai Basin

Hu Yufu Deng Liangji Xiao Haihua Shu Xiangyang Huang Chengyi Luo Lanfang
(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Soil nitrogen is necessary nutrient elements for plant in agricultural ecosystem, and excessive nitrogenous fertilizer is one of the main reasons of rural surface source pollution and water eutrophication. Therefore, understanding the spatial variability of soil nitrogen is vital for agricultural production and ecological environment protection. Qionghai lake is the second largest inland plateau freshwater lake of Sichuan Province. And it is important conservation areas for drinking water and nature reserve. Presently the water quality of Qionghai lake was mesotrophic status. Excessive nitrogen from rural surface source pollution was one of the main pollution factors. In this research, 386 soil sample points were selected by using random sampling method in Qionghai Basin, and soil physical and chemical properties were analyzed. Furthermore, spatial variability of soil nitrogen in the surface layer of this region was analyzed by using the geostatistics and GIS method, and its influential factors were also analyzed by means of variance analysis and buffer analysis. The results showed that the contents of soil total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) were (1.85 ± 0.51) g/kg and (138.5 ± 47.7) mg/kg, respectively. Variable coefficients of TN and AN were 27.52% and 32.24%, respectively, which belonged to a moderate level. Geostatistical analysis suggested that the spatial autocorrelations of soil TN and AN were moderate level, and random factors played a more important role in spatial variability than structural factors. The spatial variability of soil TN and AN were anisotropic, and obvious in northeast-southwest direction. TN

收稿日期: 2014-09-11 修回日期: 2014-12-09
^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAK51B02)和四川省科技支撑计划资助项目(2010NZ0105、2011SZ023、2013SZ0110、2014SZ0059)
作者简介: 胡玉福,副教授,博士,主要从事 3S 技术在资源环境中的应用研究, E-mail: 66433119@qq.com

and AN in the area were distributed in band and patches. Regions with high soil TN and AN contents were mainly distributed in southeast suburbs of Xichang City, and decreased gradually to north, east and south. Regions with low soil TN and AN contents were mainly distributed in north lakeshore zone of Qionghai lake. Spatial variability of soil TN and AN was significantly influenced by land use types, soil parent materials, soil textures, soil pH values as well as distributions of city, town, river and Qionghai lake. There was no significant correlation between spatial variability of soil TN and AN contents and roads.

Key words: Soil nitrogen Geostatistics Spatial variability GIS Buffer analysis

引言

氮元素不仅是植物生长必需的营养元素,也是农村面源污染和水体富营养化的主要元素^[1-2]。近年来,由于过量施用氮肥导致农田氮肥损失及对环境的影响受到国内外的广泛关注^[3-4]。土壤氮素含量的空间变异性是引起区域氮素迁移转化过程模拟不确定性的一个重要原因^[5-6],因而在进行区域氮素迁移环境风险评价中必需及时监测和掌握区域土壤氮素的空间变异及影响因素。已有研究表明,土壤氮素受植被、地形、母质、土地利用和施肥管理措施的影响而导致其具有明显的空间变异性,但不同区域不同尺度其变化特征以及主要影响因子不尽相同,现有研究多集中从地形、地貌、母质、土地利用方式、施肥管理、土壤理化性质等角度讨论土壤氮素空间变异的影响因素^[5-8]。缓冲区分析是分析判断空间实体对影响范围和程度的基本方法^[9],目前借助 GIS 技术采用缓冲区分析方法讨论河流、城镇、水域、道路对土壤氮素空间变异的研究相对缺乏。陈肖等采用缓冲区分析了城镇对土壤氮素空间分布的影响^[10]。邛海是四川省第二大内陆高原淡水湖泊,也是重要的饮用水源保护地和自然保护区。20 世纪 90 年代以来,随着邛海周边社会经济的快速发展,邛海流域环境污染、生态破坏愈见严重,水体营养化水平提高,严重威胁到区域生态安全和生态系统健康,据相关研究,目前邛海水质已处于中营养化状态,来源于农村面源污染的氮是邛海主要的污染因子^[11-12]。本文在 ArcGIS 9.2 软件平台的支持下,运用地统计学、缓冲区分析和叠置分析等方法,研究邛海盆地土壤全氮和速效氮的空间分布特征及其影响因素,以期为区域土壤氮素的调控和管理,邛海生态环境建设与保护提供科学依据。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

邛海位于西昌市城东南约 5 km 处(东经 102°18′,北纬 27°49′),为四川省第二大内陆高原淡水湖泊,属于长江流域、雅砻江水系。邛海周长 37.4 km,西北

至东南湖长 11.4 km,西北段宽 1.5 km,东南段宽 4 km,平均水深 14 m,最深处达 34 m,湖面海拔高度 1 510 m,湖面面积 27.408 km²,蓄水量逾 3.2 亿 m³。邛海既是西昌市重要饮用水源地,又是动植物栖息生存繁衍的环境,对西昌的局地气候、生态环境和社会经济发展起着举足轻重的作用。邛海盆地东、南、西三面山体环绕,包括邛海水域及四周岸滨平原及缓坡地带,西侧为泸山,南侧为大箐梁子向北延伸的山体余脉,东面为小花山和尔吾山,北面为邛海沿湖平原,西北侧即西昌市主城区。邛海盆地所在区域属中亚热带高原季风气候,光热资源丰富,冬暖夏凉,雨热同季,全年平均日照时数 2 432 h,无霜期 273 d,多年平均气温 17.2℃,最高气温 36.0℃,最低气温 -2.8℃;雨量充沛,多年平均降水量 1 087.5 mm,主要集中在 6—11 月,占总降水量的 90% 以上。盆地内地势平坦,人口密集,土壤肥沃,农业生产条件优越,是西昌市重要的粮油作物生产区。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集与测定

土样样点的设计综合考虑区内成土母质、地貌、水文、植被以及土壤类型分布等资料按随机分层抽样原则进行,在 1:10 000 地形图上概略确定采样点位置。野外采样根据实地情况调整后,用 GPS (Etrex)定位读取采样点坐标,共计 386 个待测土壤样(图 1)。为增加土样的代表性,采样时间是 2012 年 10 月,每个样点在同一地块内随机采集 5 个耕层(0~20 cm)土样混合组成待测样品,用四分法约取土样 1 kg,所有样品均带回实验室,分出杂物,风干,磨碎,过 2 mm 和 0.25 mm 筛,装袋待测。土壤颗粒组成分析采用比重计法测定,土壤 pH 值采用电位法测定,土壤全氮(TN)含量分析采用半微量开氏法,土壤速效氮(AN)含量分析采用碱解扩散法^[13]。

1.2.2 地统计学分析

对于土壤空间变异性的研究,以往多采用 Fisher 所创立的传统统计方法进行分析。对每一个观测值的空间位置并未重视,因此在很多情况下很难确切描述土壤特性的空间分布。随着研究的不断



图 1 土壤采样点分布图

Fig.1 Map of soil sampling points

深入,从 20 世纪 70 年代开始,地统计方法逐步发展,地统计学现已被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律的最为有效的方法之一,变异函数是地统计学的基本工具,用于计算变异函数的公式为^[9,14]

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (1)$$

式中 $\gamma(h)$ ——半方差函数

h ——样点空间间隔距离,称为步长

$N(h)$ ——间隔距离为 h 时的所有观测样点的成对数

$Z(x_i)$ 、 $Z(x_i + h)$ ——在空间位置 x_i 、 $x_i + h$ 点的实测值

根据变异函数的定义,当 $h=0$ 时, $\gamma(h)=0$,但由于测量误差和空间变异,其 $\gamma(h)$ 不为 0,即存在块金值 C_0 ; $\gamma(h)$ 先随着 h 的增大而增大,当 h 增大到一定程度时, $\gamma(h)$ 将维持在一定水平不再增加,此时的 $\gamma(h)$ 称为基台值 $C + C_0$, C 表示结构方差;此时的 h 定义为变程 a 。空间相关性的强弱可由 $C_0/(C + C_0)$ 来反映,该值越大,空间相关性越强,相应地, $C_0/(C + C_0)$ 称为基底效应,表示样本间的变异特征,该值越大,表示样本间的变异更多由随机因素引起。

克里格插值(Kriging)又称空间局部插值法,是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法^[12,15],即

$$Z(x_0) = \sum_{i=0}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中 $Z(x_0)$ ——未知样点的值

λ_i ——第 i 个已知样本点对未知样点的权重

n ——已知样本点的个数

1.2.3 缓冲区分析

缓冲区分析(Buffer analysis)是地理信息系统中基本的空间分析功能之一,是以点、线、面实体为基础,自动建立其周围一定宽度(缓冲距离或半径)范围内的缓冲区多边形图层,并与相应图层进行叠置分析,以判断空间实体影响范围的过程^[9]。在地理信息系统领域内生成的缓冲区多是基于欧氏距离的缓冲区,即缓冲区为与所指空间实体或实体集一定缓冲距离范围内的面状或带状区域^[10]。本研究在 ArcGIS 9.2 软件平台的支持下,以西昌市主城区、邛海水域为面实体影响源,以河流和道路为线实体影响源,考虑各实体的影响范围和程度,分别设置缓冲距离进行缓冲区分析;探讨城市、邛海、河流道路对研究区土壤全氮和速效氮的影响。

1.2.4 软件平台和数据处理

土壤氮素的空间变异分析、克里格插值(Kriging)和缓冲区分析(Buffer analysis)在 ArcGIS 9.2 平台上进行;常规统计分析、回归分析、方差分析在 SPSS 19.0 下进行。

2 结果与分析

2.1 土壤氮素含量常规统计分析

统计分析结果表明,研究区表层土壤全氮和速效氮含量总体水平均较高,土壤全氮含量为 0.49 ~ 3.94 g/kg,平均值为 1.85 g/kg,土壤速效氮介于 36.0 ~ 265.0 mg/kg,平均值为 138.5 mg/kg(表 1)。按全国第二次土壤普查的氮素含量分级标准^[16],研究区土壤全氮含量为 I 级(大于 2.0 g/kg)、II 级(1.5 ~ 2 g/kg)、III 级(1 ~ 1.5 g/kg)、IV 级(0.75 ~ 1 g/kg)、V 级(0.5 ~ 0.75 g/kg)和 VI 级(小于 0.5 g/kg)的土壤样点分别占总样点数的 41.31%、33.65%、17.45%、4.94%、2.42% 和 0.23%;土壤速效氮含量为 I 级(大于 150 mg/kg)、II 级(120 ~ 150 mg/kg)、III 级(90 ~ 120 mg/kg)、IV 级(60 ~ 90 mg/kg)、V 级(30 ~ 60 mg/kg)和 VI 级(小于 30 mg/kg)的土壤样点分别占总样点数的 37.76%、33.59%、20.31%、5.21%、3.31% 和 0。从变异系数来看,土壤全氮和速效氮含量的变异系数分别为 27.52% 和 32.24%,属中等差异强度,土壤速效氮的变异程度较土壤全氮强。由直方图和正态分布(图 2)可看出,研究区土壤全氮和速效氮均较好的呈现正态分布特征,土壤全氮的峰度为 3.191,偏度为 0.032;速效氮的峰度为 3.325,偏度为 -0.048,经单样本的 Kolmogorov - Smirnov (K - S) 检验,结果表明,研究区土壤全氮和速效氮均符合正态分布($P>0.05$),满足地统计学分析的要求。

表 1 研究区土壤氮素含量统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of soil TN and AN contents in study areas

项目	样本数/个	最大值	最小值	中数	平均值	标准差	变异系数/%	峰度	偏度	K-S 检验 <i>P</i>
TN 质量比/(g·kg ⁻¹)	386	3.94	0.49	1.83	1.85	0.51	27.52	3.191	0.032	0.656
AN 质量比/(mg·kg ⁻¹)	386	265.0	36.0	139.0	138.5	47.7	32.24	3.325	-0.048	0.683

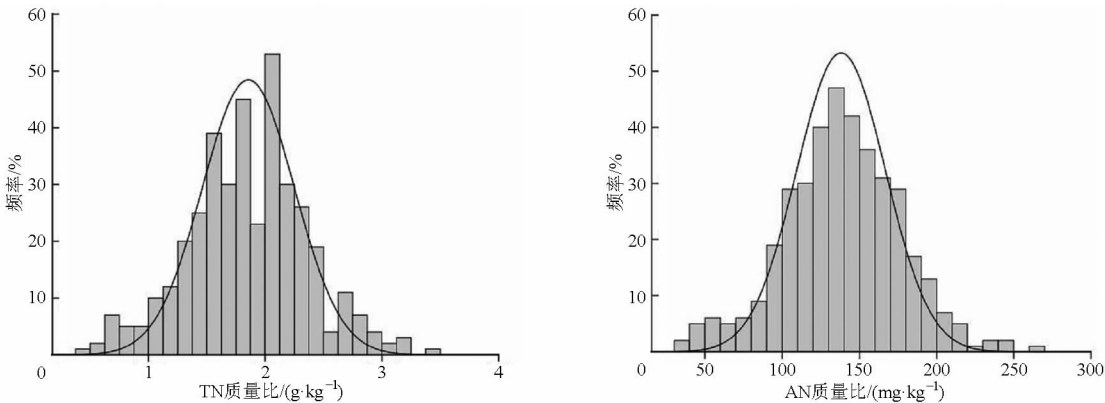


图 2 土壤全氮和速效氮含量直方图

Fig. 2 Histograms of soil TN and AN contents in study areas

2.2 土壤氮素的空间变异特征分析

2.2.1 变异函数分析

常规统计分析只能说明土壤全氮和速效氮的样点情况,而对其空间分布特征却难以反映。本研究根据 ArcGIS 9.2 软件地统计学模块下分隔距离和计算出的半方差,采用球状模型进行拟合,得到研究区表层土壤全氮和速效氮含量半方差函数模型及其参数(表 2)。结果表明,研究区土壤全氮和速效氮空间变异均具有各相异性特征,其中土壤全氮的长、短轴变程分别为 15.99 和 5.84 km,长轴方位角为 118.7°;土壤速效氮的长、短轴变程分别为 16.67 和 5.00 km,长轴方位角为 132.8°,表明土壤全氮和速效氮均在西北-东南方向空间变异相对剧烈。块金值与基台值之比 $C_0/(C_0 + C)$ 可表示空间变异性程

度(随机部分引起的空间变异性占系统总变异的比列),如果该比值较高,说明由施肥、灌溉等随机因素引起的空间变异性程度较大;相反,则由母质、地形等结构性因素引起的空间变异性程度较大;如果该比值接近于 1,则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。从结构性因素看, $C_0/(C_0 + C)$ 的比值可表示系统变量的空间相关性程度,比值小于 25%,说明变量具有强烈的空间相关性;比值在 25%~75%之间,变量具有中等的空间相关性;比值大于 75%,变量空间相关性很弱^[9,14]。土壤全氮和速效氮的 $C_0/(C_0 + C)$ 值分别为 54.69% 和 60.04%,表明土壤全氮和速效氮均有中等程度空间相关性,随机因素引起的空间变异相对较结构性因素引起的空间变异大。

表 2 土壤氮含量的地统计学参数

Tab. 2 Geostatistical parameters of soil TN and AN contents

项目	模型	趋势阶数	变程/km		长轴方位角/(°)	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	块金值占基台值百分比/%
			长轴	短轴				
TN 质量比	球状	2 阶	15.99	5.84	118.7	0.191	0.32	54.69
AN 质量比	球状	2 阶	16.67	5.00	132.8	1038.4	1729.62	60.04

2.2.2 土壤氮素的空间分布特征

在 ArcGIS 9.2 软件平台上采用普通克里格法 (Ordinary Kriging) 分别进行空间插值获得研究区土壤全氮和速效氮含量的空间分布图(图 3)。

研究区土壤全氮含量总体上呈条带状或斑块状分布特征,高值区(大于 2.00 g/kg)主要位于西昌市的东南郊区,其面积占研究区面积的 24.62%,并以此高值中心向北、向东和向南 3 个方向呈现递减趋

势;研究区中部、东部和西南部土壤全氮含量多介于 1.40~2.00 g/kg,其面积占 65.69%;低值区(小于 1.40 g/kg)主要出现在邛海北面近湖岸地带以及研究区的北端,其面积占 9.59%。土壤速效氮含量空间分布特征总体上与全氮相似,高值区(大于 150 mg/kg)主要位于西昌市的东南郊区,其面积占 27.36%,含量介于 90~150 mg/kg 的区域主要分布在研究区的中部、东部和西南部,其面积占

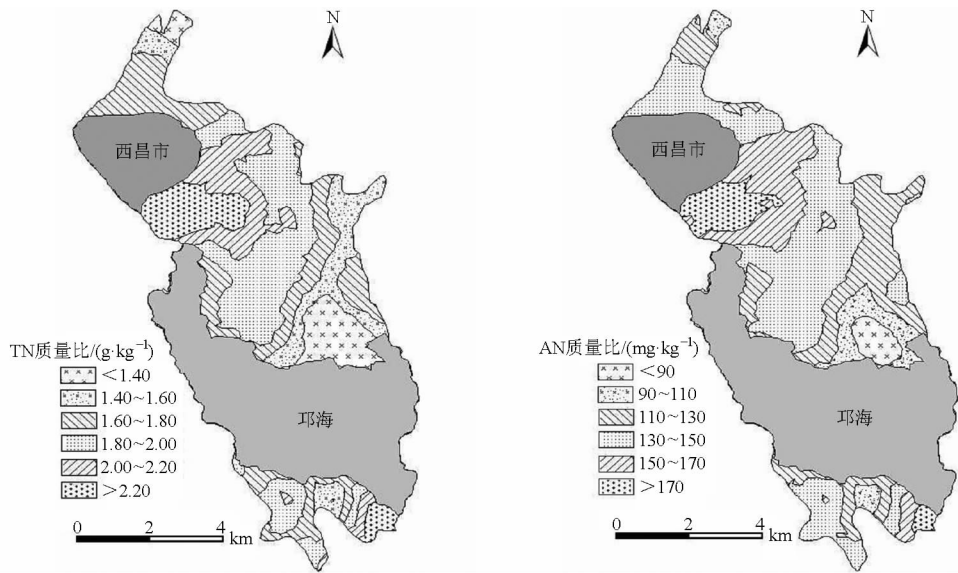


图3 土壤全氮和速效氮含量空间分布图

Fig.3 Spatial distribution maps of soil TN and AN contents

68.52%, 低值区 (小于 90 mg/kg) 主要出现在邛海北面近湖岸地带,其面积占 4.12%。

2.3 土壤氮素影响因素分析

2.3.1 土地利用方式

方差分析结果表明,土地利用方式对土壤全氮和速效氮含量均有显著的影响,其中对土壤全氮含量的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$);对土壤速效氮含量的影响达到显著水平 ($P < 0.05$) (表 3)。4 种不同的土地利用方式下,土壤全氮平均含量呈现出菜地 > 水田 > 园地 > 旱地的趋势,其中,菜地极显著高于其他土地利用方式,水田极显著高于园地和旱地,园地极显著高于旱地。不同土地利用方式之间土壤速效氮平均含量的变化与全氮基本一致,也呈现出菜地 > 水田 > 园地 > 旱地的特征,其差异也达极显著水平。从研究区土壤氮素空间分布图来看,西昌市城市周边土壤全氮和速效氮含量较高 (图 3),其原因与西昌市城郊结合部菜地分布较多有关。人为耕作、施肥是导致菜地氮素含量较高的主要原因,尤其是农户受经济利益的驱动更加关注菜地的施肥管理,据调查研究区农户对菜地的施肥习惯多以农家肥、堆肥为主,施肥及管理水平明显高于其他土地利用方式。由于淹水种稻水田土壤长期滞水的还原条件,机质分解缓慢,因而其土壤全氮和速效氮含量也较高,另一方面近年来该区推广秸秆还田、轮间作绿肥等措施提升土壤有机质含量也是导致水田土壤有机质和全氮含量较高的主要原因。旱地人为的扰动大,土壤通气性好,有机质分解迅速是导致其土壤氮素含量较低的主要原因^[7-8]。

2.3.2 土壤质地

不同质地土壤的全氮平均含量呈现出重壤土

表 3 不同土地利用方式下土壤氮素含量

Tab.3 Soil TN and AN contents in different land uses

项目	土地利用方式				F
	菜地	旱地	水田	园地	
样本数/个	65	115	168	38	
TN 质量比 /(g·kg ⁻¹)	1.85 ^{Aa}	0.85 ^{Dd}	1.54 ^{Bb}	1.12 ^{Cc}	6.432 ^{**}
AN 质量比 /(mg·kg ⁻¹)	179.61 ^{Aa}	79.1 ^{Cd}	129.3 ^{Bb}	93.4 ^{Cc}	4.026 [*]

注:多重比较采用最小显著性差异 (LSD) 法,小写字母代表 $P < 0.05$ 显著水平,大写字母代表 $P < 0.01$ 显著水平,处理之间有相同字母者差异不显著,下同。

(1.91 g/kg) > 中壤土 (1.90 g/kg) > 轻壤土 (1.81 g/kg) > 砂壤土 (1.38 g/kg) > 砂土 (1.15 g/kg) 的特征 (表 4),方差分析结果表明,其差异达极显著水平 ($P < 0.01$),其中重壤土和中壤土全氮含量差异未达显著水平,但均显著高于轻壤土,极显著高于砂壤土和沙土,而沙土全氮含量极显著低于其他 4 种质地土壤。不同质地土壤速效氮含量呈现出中壤土 (142.57 mg/kg) > 重壤土 (140.63 mg/kg) > 轻壤土 (135.73 mg/kg) > 砂壤土 (98.13 mg/kg) > 砂土 (82.67 mg/kg) 的特征,其差异也达极显著水平 ($P < 0.01$)。说明土壤质地对土壤氮素的积累具有显著影响,土壤质地粘重,土壤颗粒细小,有利于土壤氮素的积累。结合研究区土壤氮素空间分布图 (图 3) 来看,邛海近湖岸地带土壤质地较轻,不利于氮素的积累,因而土壤全氮和速效氮的含量相对较低。

2.3.3 土壤 pH 值

从研究区不同土壤 pH 值的土壤全氮含量来看,呈现出中性土壤 (2.15 g/kg) > 微酸性土壤

(1.89 g/kg) > 微碱性土壤 (1.84 g/kg) > 酸性土壤 (1.68 g/kg) 的特点, 方差分析结果表明, 其差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。土壤速效氮含量也呈现出相似的变化特征, 即中性土壤 (161.32 mg/kg) > 微酸性土壤 (146.87 mg/kg) > 微碱性土壤 (135.43 mg/kg) > 酸性土壤 (129.79 mg/kg), 方差

分析结果表明, 其差异达极显著水平 ($P < 0.01$) (表 5)。土壤中的氮素以有机氮为主, 大多数参与有机质分解的土壤微生物适宜在中性和接近中性的环境下生长发育^[16], 因此, 在中性、微碱性和微酸性环境下土壤微生物较为活跃, 有利于有机质的矿化分解, 促进了土壤氮素的释放, 故氮素含量较高。

表 4 不同土壤质地土壤全氮和速效氮含量
Tab.4 Soil TN and AN contents in different soil textures

项目	土壤质地					<i>F</i>
	重壤土	中壤土	轻壤土	砂壤土	砂土	
样本数/个	87	115	95	51	38	
TN 质量比/(g·kg ⁻¹)	1.95 ^{Aa}	1.87 ^{Aa}	1.71 ^{Ab}	1.38 ^{Bc}	1.15 ^{Cd}	7.50 ^{**}
AN 质量比/(mg·kg ⁻¹)	140.63 ^{Aa}	142.57 ^{Aa}	132.73 ^{Bb}	98.13 ^{Cc}	82.67 ^{Dd}	9.51 ^{**}

表 5 不同土壤 pH 值土壤全氮和速效氮含量
Tab.5 Soil TN and AN contents in different soil pH values

项目	土壤 pH 值				<i>F</i>
	4.5 ~ 5.5	5.5 ~ 6.5	6.5 ~ 7.5	7.5 ~ 8.5	
样本数/个	74	185	84	43	
TN 质量比/(g·kg ⁻¹)	1.68 ^{Cd}	1.89 ^{Bb}	2.15 ^{Aa}	1.84 ^{Bc}	5.82 ^{**}
AN 质量比/(mg·kg ⁻¹)	129.79 ^{Cd}	146.87 ^{Bb}	161.32 ^{Aa}	135.43 ^{Ccd}	4.11 ^{**}

2.3.4 城镇

选取西昌市主城区作为面实体影响源, 分别以 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 km 为距离产生缓冲区, 再分别将其与土壤全氮和速效氮含量图层进行叠置分析, 探讨了西昌市主城区对城乡交错带土壤氮素含量的影响。研究结果表明, 随着缓冲距离的增加土壤全氮和速效氮含量呈现出下降的趋势, 土壤全氮含量由 2.15 g/kg 降低至 1.79 g/kg, 速效氮含量由 167.7 mg/kg 降低至 132.7 mg/kg (图 4), 经检验缓冲距离与土壤全氮和速效氮的相关性及曲线方程均达极显著水平 ($P < 0.01$)。方差分析结果表明, 不同缓冲区土壤全氮含量的差异达显著水平 ($P < 0.05$), 土壤速效氮含量差异达极显著水平 ($P < 0.01$), 说明城镇分布对研究区城乡交错带土壤氮素的空间分布具有显著影响,

这也是西昌市城郊结合部土壤氮素含量相对较高 (图 3) 的重要原因。由拟合曲线可以看出在 0 ~ 1.5 km 范围内土壤全氮和速效氮含量降低的幅度大于 1.5 ~ 3.0 km 范围内全氮和速效氮含量的降低幅度, 说明随着缓冲距离的增加土壤全氮和速效氮含量降低速度逐渐减慢, 研究结论与刘杨等基本一致, 其原因一方面受城市废水和废弃物排放的影响, 另一方面也与近郊土地集约利用程度相对较高有关^[17-18], 据实地调查城郊结合部蔬菜和果树等经济作物的发展面积相对较大, 而农户趋于对经济利用的追求, 对蔬菜和果园的施肥水平也相对较高。

2.3.5 邛海

为了探讨邛海与土壤氮素空间变异的关系, 本研究以邛海图层作为面实体影响源, 分别以 0.5、

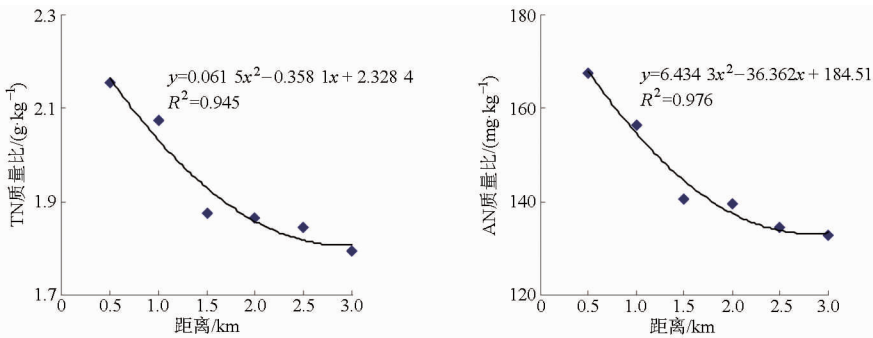


图 4 不同距离城镇缓冲区土壤全氮和碱解氮含量的变化

Fig.4 Changes of soil TN and AN contents with different buffer distances from downtown

1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 km 为缓冲距离进行缓冲区分析,统计分析不同缓冲距离缓冲区土壤氮素的含量,研究结果表明,随着缓冲距离的增加研究区土壤全氮和速效氮含量均呈现上升趋势,土壤全氮含量由 1.62 g/kg 升高至 1.94 g/kg,速效氮含量由 123.95 mg/kg 升高至 161.26 mg/kg (图 5),经检验缓冲距离与土壤全氮和速效氮的相关性及曲线方程均达显著水平 ($P < 0.05$)。方差分析结果表明,不同缓冲区范围土壤全氮和速效氮含量的差异性均达

显著水平 ($P < 0.05$),说明邛海水域对研究区滨湖地带土壤氮素的分布具有明显影响,研究区中部邛海近湖岸地带土壤氮素含量相对较低(图 3)与邛海水域的分布及影响有关。近湖岸地带土壤质地轻,受水分条件和潮汐作用的影响,土壤氮素随水淋失导致其土壤氮素含量相对较低,而远离湖岸土壤质地相对粘重,对土壤氮素的固存能力相对较强,加之受水分作用的影响减弱,因而土壤氮素含量相对较高^[19-20]。

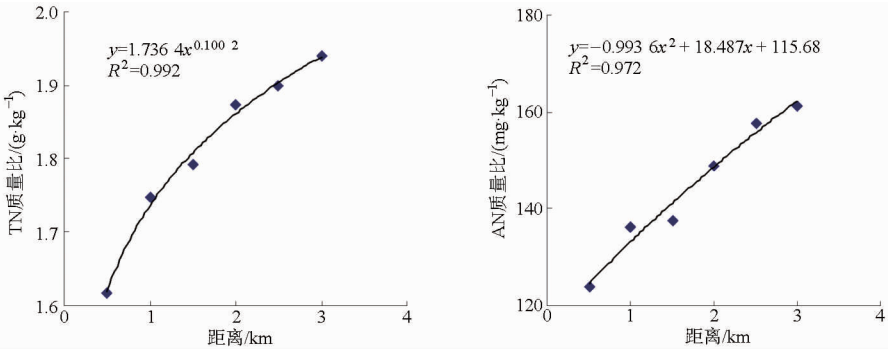


图 5 邛海不同缓冲距离土壤全氮和碱解氮含量的变化

Fig. 5 Changes of soil TN and AN contents with different buffer distances from Qionghai lake

2.3.6 河流

以研究区主要河流官坝河为例,分别以 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 km 为缓冲距离在河流两岸产生缓冲区,并统计分析不同缓冲区土壤全氮和速效氮的含量特征,探讨了河流对研究区土壤氮素空间分布的影响,研究结果表明,土壤全氮和速效氮含量均随着缓冲距离的增加而增加,其中,土壤全氮含量从 0.76 g/kg 增加到 1.67 g/kg,土壤速效氮从

56.50 mg/kg 增加到 131.83 mg/kg(图 6),经检验缓冲距离与土壤全氮和速效氮的相关性及曲线方程均达显著水平 ($P < 0.05$)。方差分析结果表明,不同缓冲区土壤全氮和速效氮均呈现极显著差异 ($P < 0.01$),说明河流对两岸土壤氮素含量分布特征具有显著影响,土壤氮素呈现出近河岸低,远河岸高的特点,这与河流沉积物分布特征及水分作用有关^[21-22]。

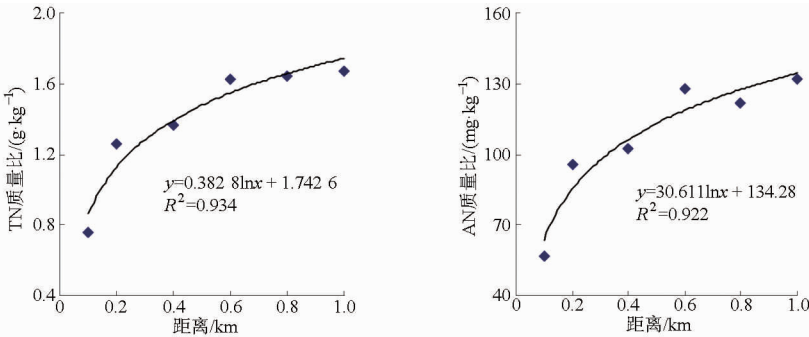


图 6 官坝河不同缓冲距离土壤氮素含量的变化

Fig. 6 Changes of soil TN and AN contents with different buffer distances from Guanba river

2.3.7 道路

道路作为农业生产的基础设施,影响农户对农业生产决策和农业生产的投入,进而影响土壤氮素含量的空间变异。为了探讨农村道路对研究区土壤氮素含量空间分布的影响,选取了研究区 2 条典型农村道路,以道路为中心分别以 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 km 为距离在两侧产生缓冲区,并对不同道路缓冲区土壤全氮和速效氮含量进行统计分析,

研究结果表明,随着与缓冲道路距离的增加,土壤全氮和速效氮含量呈现出先降低后增加的趋势(图 7),经检验缓冲距离与土壤全氮和速效氮的相关性及曲线方程均未达显著水平 ($P > 0.05$),方差分析结果表明,不同道路缓冲区范围内土壤全氮和土壤速效氮含量差异均未达显著水平 ($P > 0.05$),说明道路对土壤氮素含量有一定影响,距离道路越近,农业生产越便利,但这种影响未达显著水平,其

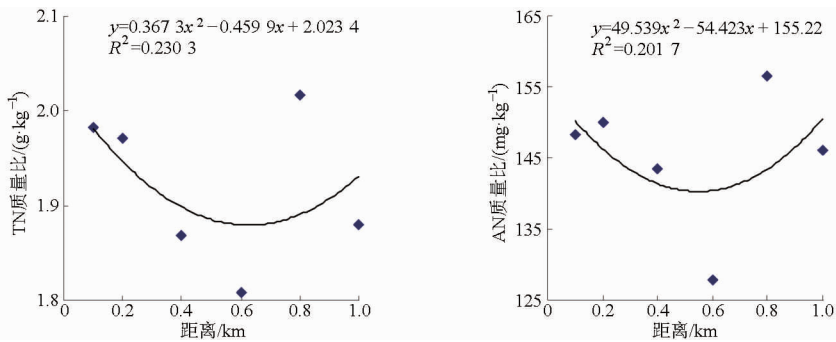


图 7 道路不同缓冲距离土壤氮素含量的变化
Fig. 7 Changes of soil TN and AN contents with different buffer distances from road

原因是农户对土地的投入和施肥管理还与土地利用方式、农户个人因素等其他因素有关。

3 结论

(1) 研究区表层土壤全氮和速效氮含量总体水平较高,土壤全氮含量介于 0.49 ~ 3.94 g/kg 之间,平均值为 1.85 g/kg,土壤速效氮介于 36.0 ~ 265.0 mg/kg 之间,平均值为 138.5 mg/kg,土壤全氮和速效氮含量的变异系数分别为 27.52% 和 32.24%,属中等差异强度。土壤全氮和速效氮均有中等程度空间相关性,空间变异均以随机变异为主,各向异性显著,均在西北-东南方向空间变异相对剧烈。

(2) 研究区土壤全氮含量总体上呈条带状或斑块状分布特征,土壤全氮高值区(大于 2.00 g/kg)主

要位于西昌市的东南郊区,并以此为中心向南、向东和向北 3 个方向呈逐步递减趋势,研究区中部、东部和西南部土壤全氮含量多介于 1.40 ~ 2.00 g/kg 之间,土壤全氮的低值区(小于 1.40 g/kg)主要出现在邛海北面近湖岸地带以及研究区的北端,土壤速效氮空间分布特征与土壤全氮相似。

(3) 土地利用方式、土壤母质、土壤质地、土壤 pH 值、城镇、河流、邛海水域对研究区土壤全氮和速效氮空间变异的影响达显著或极显著水平,道路对研究区土壤全氮和速效氮含量的空间分布影响不显著。为了提高土壤对氮素的固存和利用效率,减少氮素流失,防止农村面源污染和水体富营养化,应因地制宜,通过测土配方施肥、绿肥轮作、秸秆还田等措施加强土壤氮素的调控与管理。

参 考 文 献

1 曹志洪,林先贵,杨林章,等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能——Ⅱ. 稻田土壤氮素养分的累积, 迁移及其生态环境意义[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 256-260.
Cao Zhihong, Lin Xiangui, Yang Linzhang, et al. Ecological function of “paddy field ring” to urban and rural environment Ⅱ. characteristics of nitrogen accumulation, movement in paddy field ecosystem and its relation to environmental protection[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 256-260. (in Chinese)

2 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
Zhu Zhaoliang. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778-783. (in Chinese)

3 Yang Y H, Ma W H, Mohammad A, et al. Storage, patterns and controls of soil nitrogen in China[J]. Pedosphere, 2007, 17(6): 776-785.

4 Martínez Y, Albiac J. Nitrate pollution control under soil heterogeneity[J]. Land Use Policy, 2006, 23(4): 521-532.

5 Gilliam F S, Yurish B M, Adams M B. Temporal and spatial variation of nitrogen transformations in nitrogen-saturated soils of a central Appalachian hardwood forest[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31(10): 1768-1785.

6 张世熔, 孙波, 赵其国, 等. 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 886-892.
Zhang Shirong, Sun Bo, Zhao Qiguo, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen at multi-scales in hilly region in south China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 886-892. (in Chinese)

7 杨小林, 李义玲, 朱波, 等. 紫色土小流域不同土地利用类型的土壤氮素时空分异特征[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2807-2813.
Yang Xiaolin, Li Yiling, Zhu Bo, et al. Spatial and temporal variations of soil nitrogen under different land uses in a small watershed in the purple soil area, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(10): 2807-2813. (in Chinese)

8 赵业婷, 李志鹏, 常庆瑞. 关中盆地县域农田土壤碱解氮空间分异及变化研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(6): 1030-1038.
Zhao Yeting, Li Zhipeng, Chang Qingrui. Study on spatial variability and change of soil alkali-hydrolyzable nitrogen in Guanzhong basin county-level farmland[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(6): 1030-1038. (in Chinese)

- 9 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- 10 陈肖, 张世熔, 黄丽琴, 等. 成都平原土壤氮素的空间分布特征及其影响因素研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2007, 13(1): 1-7.
Chen Xiao, Zhang Shirong, Huang Liqin, et al. Spatial distribution character and its influential factors of soil nitrogen in Chengdu Plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2007, 13(1): 1-7. (in Chinese)
- 11 张万明. 高原湖泊西昌邛海湖湖区水资源与水水环境保护研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2007.
Zhang Wanming. Research into the water resource and water environmental protection of highland Xichang Qionghai lake[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 12 辜晓琬, 雷波, 肖杰, 等. 邛海水质变化趋势及保护对策研究[J]. 四川环境, 2013, 32(5): 77-82.
Gu Xiaowan, Lei Bo, Xiao Jie, et al. Study on change trend and protection countermeasures of the water quality in Qionghai lake basin[J]. Sichuan Environment, 2013, 32(5): 77-82. (in Chinese)
- 13 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- 14 谭万能, 李志安, 邹碧, 等. 地统计学方法在土壤学中的应用[J]. 热带地理, 2005, 25(4): 307-311.
Tan Wanneng, Li Zhian, Zou Bi, et al. The application of geostatistics to soil science[J]. Tropical Geography, 2005, 25(4): 307-311. (in Chinese)
- 15 刘杨, 孙志梅, 杨军, 等. 京东板栗主产区土壤氮磷钾的空间变异[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 901-907.
Liu Yang, Sun Zhimei, Yang Jun, et al. Spatial variability of soil N, P and K in main production area of *Castanea mollissima* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 901-907. (in Chinese)
- 16 四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土种志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994.
- 17 王彩绒, 吕家珑, 胡正义, 等. 太湖流域典型蔬菜地土壤氮及 pH 空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 17-20.
Wang Cairong, Lü Jialong, Hu Zhengyi, et al. Spatial variability of soil nitrogen and pH in vegetable field in typical area of Taihu lake watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 17-20. (in Chinese)
- 18 武俊喜, 焦加国, 肖红生, 等. 长江平原区乡村景观的结构管理及其对土壤氮磷的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3606-3617.
Wu Junxi, Jiao Jiaguo, Xiao Hongsheng, et al. Landscape structure, management and soil total nitrogen, total phosphorus in the densely populated rural landscapes of China's Yangtze Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3606-3617. (in Chinese)
- 19 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土. 黄河口滨岸潮滩湿地土壤碳, 氮的空间分异特征[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1522-1529.
Mou Xiaojie, Sun Zhigao, Liu Xingtu. Spatial distribution patterns of carbon and nitrogen in the tidal marsh soil of the Yellow river estuary[J]. Scientia Geographical Sinica, 2012, 32(12): 1522-1529. (in Chinese)
- 20 王青, 袁勇, 李传哲, 等. 白洋淀湿地土壤氮素空间分布特征研究[J]. 环境保护科学, 2013, 39(4): 1-6.
Wang Qing, Yuan Yong, Li Chuanzhe, et al. Research of the spatial distribution characteristics of soil nitrogen in the Baiyangdian wetland[J]. Environmental Protection Science, 2013, 39(4): 1-6. (in Chinese)
- 21 陈为峰, 史衍玺, 田素锋, 等. 黄河口新生湿地土壤氮磷分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 69-73.
Chen Weifeng, Shi Yanxi, Tian Sufeng, et al. Study on distribution characteristics of soil nitrogen and phosphorus in new-born wetland of Yellow river estuary[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 69-73. (in Chinese)
- 22 付意成, 阮本清, 许凤冉, 等. 永定河流域农业土壤氮磷损失的计算及分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 133-139.
Fu Yicheng, Ruan Benqing, Xu Fengran, et al. Calculation and analysis of agricultural soil nitrogen and phosphorus loss in Yongding River Basin[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 133-139. (in Chinese)
- 23 王圣伟, 冯娟, 刘刚, 等. 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 128-135.
Wang Shengwei, Feng Juan, Liu Gang, et al. Multi-nesting spatial scales of soil heavy metals in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 128-135. (in Chinese)
- 24 李文军, 杨奇勇, 彭保发, 等. 西南岩溶区土壤全氮含量的空间变异分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 150-154.
Li Wenjun, Yang Qiyong, Peng Baofa, et al. Spatial variability of total soil nitrogen content in karst area of southwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 150-154. (in Chinese)