

丹江口库区入库河口土壤养分的空间变异研究 ——以青塘河河口为例

雷俊山^{1,2}, 尹 炜²

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051)

摘要:通过探究河口土壤养分状况及空间变化规律,为入库河口生态修复提供理论依据,以丹江口水库青塘河入库河口为例,采用传统描述性统计和地统计分析法,对入库河口表层土壤养分空间变异特征进行了研究。结果表明,土壤各养分指标变异系数为38.6%~97.9%,除速效磷外,总体属中等强度变异。研究区土壤各养分指标均具有中等程度的空间自相关性,自相关距离为272~2110 m,由大到小依次为:速效磷>碱解氮>有机质>速效钾。研究区土壤有机质含量为7.97~45.03 g/kg,处于中等偏上水平,碱解氮含量为42.97~178.70 mg/kg,处于中等偏下水平,速效磷含量为5.03~121.40 mg/kg,速效钾含量为62.50~820.65 mg/kg,分别达到丰富和极丰富水平。受土壤母质、地形、气候等非人为因素和施肥、作物、管理水平等人为因素影响,研究区有机质、速效磷和碱解氮均呈现出由东南向西向北方向逐渐递减的趋势,速效钾在中部偏东处含量最高。与传统统计方法相比,地统计分析能较好地反映土壤养分含量的结构性、随机性、独立性和相关性。研究结果可为丹江口水库青塘河入库河口植被恢复与生态修复提供理论依据。

关键词:丹江口水库;土壤养分;空间变异;地统计学方法

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)03-0013-06

养分是土壤肥力的物质基础,也是决定植物生物量及其生产力的重要因素之一(侯扶江等, 2002)。土壤养分的空间变异是其基本属性之一,土壤母质、质地、有机质含量、pH值和土地利用都会造成土壤养分状况的空间分布差异(Berndtsson et al, 1993),了解土壤养分的空间分布特征是其资源合理利用、肥力评价、养分管理的前提和基础(李建辉等, 2011),同时也可作为土壤质量的恢复和改良、生态环境的改善与修复提供依据。近年来,对水源保护区(胡艳霞等, 2013)、沙化地区(苗恒录等, 2011)、喀斯特地区(张伟等, 2013; 范夫净等, 2014)、黄土高原地区(刘志鹏, 2013)重要生态功能区或生态脆弱区土壤养分的空间变异研究也越来越受到重视,但对入库河口的研究还较少。

丹江口水库是南水北调中线水源地,除汉江和丹江外,来水主要通过入库支流进入水库(李思悦和张全发, 2008)。河口是控制外源污染进入水库的最后一道屏障,建立良好的河口植被生态系统能

有效限制和减少污染物进入水库(李秋华等, 2011)。研究表明,植被群落对保持水土、涵养水源、稳定库岸、拦截地表径流中的污染物有明显效果(扈祥来等, 2000; 李德生等, 2003; 万成炎等, 2009)。然而,随着丹江口水库大坝加高蓄水,入库河口将被淹没,对河口植被生态功能产生不利影响。因此,在蓄水前研究入库河口土壤养分的空间变异特征对植被恢复及生态修复具有重要意义。本文以丹江口水库青塘河入库河口为例,研究河口土壤养分状况及空间变化规律,以期对入库河口生态修复提供理论依据。

1 区域概况

研究区位于湖北省丹江口市习家店镇,为青塘河入丹江口水库河口,高程为147~175 m。青塘河发源于海拔300~500 m的丘陵山地,系汉江的一级支流,从北向南汇入丹江口水库,水系呈树枝状,主要沟壑有东沟、黑沟和皮条沟。流域属汉江北岸丘陵岗地,地势北高南低,地形复杂,山高谷低,切割深。青塘河流经青塘、朱家院、五龙池、板桥、行陡坡5个村进入丹江口水库,流域面积48.03 km²,地貌类型以丘陵和岗地为主。土壤类型有石灰土、紫色土和黄棕壤,土层深厚。林地以柏树为主,灌木林主

收稿日期:2015-09-18

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAC06B03)。

作者简介:雷俊山,1979年生,男,高级工程师,博士研究生,主要从事水土保持、生态修复和农业面源污染控制方面的研究。E-mail: ljs_2008@sina.com

要有杨树、刺槐和紫穗槐,经济林以柑桔和山楂为主,无成片草场,林草覆盖率 35.40%。青塘河流域属北亚热带半湿润季风气候,多年平均气温 16.1℃,年均降水量 797.6 mm。

2 研究方法

2.1 样品采集和制备

以丹江口水库大坝加高蓄水后青塘河入库的新增淹没区为研究区域,面积约为 0.378 km²。采样时,垂直于河流两岸均匀布设 6 条采样条带,每条采样条带根据地形均匀布设采样点,包含各种土地利用,采样点分布见图 1,各采样点的土地利用状况见表 1。采集表层 0~20 cm 的土壤,记录每个采样点的坐标,在样点附近均匀取 3~5 个点,以混合土样作为该点的样品,共采集土壤样品 31 个。拣出采集土壤杂物,磨碎后过 2 mm 和 0.149 mm 孔筛,用于测定 pH 值、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾指标。pH 值采用 pH 值计法(1:2.5),碱解氮采用碱解扩散法,速效磷采用碳酸氢钠法,速效钾采用醋酸铵浸提火焰光度计法,有机质采用外加热重铬酸钾溶液法。为减小分析过程中的误差,增强数据的精确度,每个样品各指标分别进行 3 次重复测试。

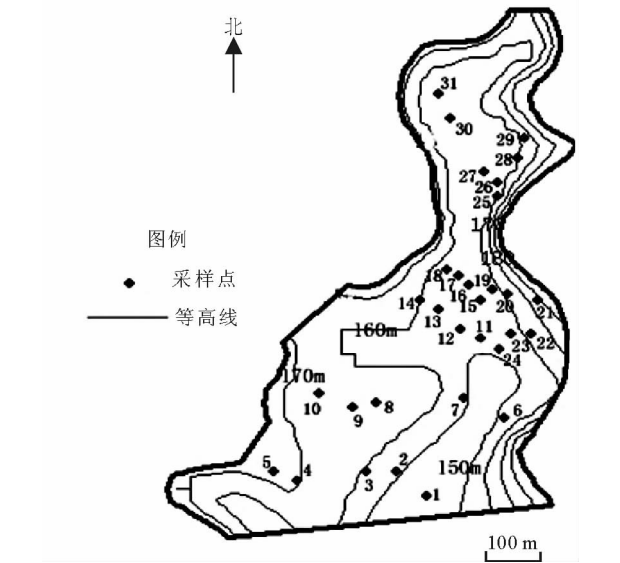


图 1 采样点分布
Fig.1 Soil sampling sites

2.2 统计方法

采用描述性统计分析方法及地统计学的半方差函数和 Kriging 插值法研究青塘河入库河口区域土壤养分的空间变异特征。描述性统计方法是一种对数据进行处理的传统方法,本次数据统计包括最大值、最小值、平均值、中值、标准差、方差、变异系数

(张过师等,2009),各指标数据采用 SPSS 19.0 进行处理;同时本文还采用地统计学中的半方差函数和 Kriging 插值法进行数据分析。半方差分析采用 GS+9.0 软件,土壤养分空间分布采用 ArcGIS10.0 的地统计分析模块进行。

表 1 采样点的土地利用状况
Tab.1 Landuse for each soil sampling site

序号	土地利用	采样点号
1	河漫滩荒地	28,29,30,31
2	河漫滩沼泽	26,27
3	人工林地	8,11,12,15,16,17,18,19,22
4	农田	5,6,7,14,20,21
5	撂荒地	1,2,3,4,9,10,18
6	河岸草地	13,24
7	经果林	23

3 结果与分析

3.1 土壤养分的传统统计分析

3.1.1 pH 值及养分特征 对入库河口土壤养分数据进行描述性统计分析是建立土壤变异模型的前提和基础。利用 SPSS 19.0 对研究区 31 个采样点土壤 pH 值及养分含量的统计分析结果见表 2。可以看出,土壤 pH 值为 6.5~7.6,变异系数为 3.70%,变异程度较弱,土壤基本为中性。土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量变化范围分别为 42.97~178.70 mg/kg、5.03~121.40 mg/kg 和 62.50~820.65 mg/kg;有机质含量为 7.97~45.03 g/kg,土壤养分各指标均存在一定程度的梯度变化。土壤养分指标变异系数为 38.6%~97.9%,除速效磷外,其他属于中等变异(宋云等,2009)。变异程度从大到小依次为:速效磷>速效钾>有机质>碱解氮,其中速效磷的变异系数最大,为 97.9%,为强度变异。

根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准(全国土壤普查办公室编,1979),土壤有机质含量处于中等水平,碱解氮为贫瘠水平,速效磷和速效钾分别达到丰富和极丰富的水平。比较各养分含量的中值和均值,有机质的中值与均值差别较小,说明样本数值受特征值影响较小,同时也表示其均值的代表性较强。速效磷和速效钾均值与中值差异较大,说明样本数值在一定程度上受到特异值的影响,尤其是速效钾,由于个别较大值影响,中值与均值存在较大的差异。

3.1.2 土壤 pH 值及养分指标的相关性分析 土壤养分指标之间的 Pearson 相关系数见表 3。 $|r| = >0.8$,表示两变量之间具有较强的线性相关关系; $|r| = <0.3$,表示两变量之间线性关系较弱

表 2 土壤 pH 值及养分的描述性统计

Tab.2 Descriptive statistics of the soil nutrients

序号	项 目	最大值	最小值	中值	平均值	标准差	变异系数/%
1	pH 值	7.56	6.53	7.26	7.17	0.27	3.70
2	碱解氮/mg·kg ⁻¹	178.70	42.97	74.30	84.52	32.63	38.6
3	速效磷/mg·kg ⁻¹	121.40	5.03	21.88	29.91	29.30	97.9
4	速效钾/mg·kg ⁻¹	820.65	62.50	199.86	268.14	186.26	69.5
5	有机质/g·kg ⁻¹	45.03	7.97	21.09	22.71	9.80	43.2

(马军,2009;谭荣波、梅晓仁,2010)。pH 值与各养分指标均呈现负相关关系,表明土壤酸性越强的区域,其养分全量含量和有效性均较高。养分指标中,pH 值与速效钾呈极弱相关性,与其他指标均呈中等相关;土壤各个养分指标之间也均存在不同程度的正相关关系,其中有机质与碱解氮呈显著正相关,表明有机质的积累与分解速率对土壤碱解氮的分布有重要影响;其他养分指标之间的相关性均处于中等相关水平。

表 3 土壤 pH 值及养分指标的相关系数

Tab.3 Correlation analysis of soil nutrients

指标	pH 值	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质
pH 值	1				
碱解氮	-0.611	1			
速效磷	-0.415	0.532	1		
速效钾	-0.170	0.359	0.803	1	
有机质	-0.558	0.903	0.650	0.502	1

3.2 土壤养分的地统计分析

要准确反映土壤养分的随机性、结构性、独立性和相关性,需进一步采用地统计方法分析土壤养分空间变异结构(Cambardella et al,1994;王彩绒和吕家珑,2005)。地统计学注重变量因子的空间过程,考虑其空间分布特征和空间自相关性(王军等,2000)。在地统计分析中,半方差函数的计算一般要求数据符合正态分布或者近似正态分布,否则可能产生比例效应,从而使半方差函数产生畸变,抬高基台值和块金值,增加估计误差,甚至会掩盖其固有的结构;因此,只对呈正态分布或对数正态分布的指标进行半方差分析(高玉蓉等,2005)。

3.2.1 变量的正态分布检验及半方差分析 偏度系数与峰度系数广泛应用于检验数据是否对称以及是否符合正态分布的指标。当频数分布为正态时,偏度系数(skewness)和峰度系数(kurtosis)分别等于 0 和 3。研究区土壤养分数据的偏度系数和峰度系数见表 4。可以看出,正态分布检验结果显示,有机质偏度系数较小,峰度系数接近 3,属于或接近正态分布;碱解氮、速效钾和速效磷经对数转换后均呈正态分布(张敏,2010)。因此,研究区各土壤养分条

件均满足地统计分析的假设条件。

表 4 土壤养分的偏度系数和峰度系数

Tab.4 Skewdness and kurtosis coefficients of soil nutrients

指标	偏度系数		峰度系数		分布类型
	变换前	对数变换后	变换前	对数变换后	
碱解氮	1.110	0.404	3.716	2.484	对数正态
速效磷	2.107	0.463	6.87	2.701	对数正态
速效钾	1.337	0.22	4.194	2.276	对数正态
有机质	0.717		2.782		正态

采用 GS + 9.0 对研究区土壤养分指标进行半方差分析,计算不同距离和步长下各土壤养分的半方差模型(范铭丰,2010)。根据拟合程度和残差值选取相应拟合模型,分析结果及相应参数见表 5,各指标的半方差分析结果见图 2。可以看出,研究区有机质、碱解氮和速效钾均具有较好的半方差结构,与拟合模型的决定系数为 0.586 ~ 0.979,速效磷与拟合模型的决定系数为 0.246。有机质和速效磷的半方差函数符合指数模型,速效钾符合高斯模型,碱解氮符合球状模型。

表 5 土壤养分的半方差函数及拟合参数

Tab.5 Semi-variogram and fitting parameters for soil nutrients

变 量	拟合模型	块金值	基台值	块金值:基台值/%	变程 (A ₀)/m	决定系数 (R ²)
		(C ₀)	(C ₀ + C)			
碱解氮	球状模型	0.059	0.222	26.30	991	0.718
速效磷	指数模型	0.517	1.732	39.80	2110	0.246
速效钾	高斯模型	0.299	0.680	44.00	272	0.697
有机质	指数模型	69.100	173.800	39.76	869	0.691

采用块金效应评价研究区土壤各养分的空间相关性。总体来看,碱解氮和速效钾的块金值都较小,表明在最小间距内变异分析过程引起的误差较小。按照区域化变量空间相关程度的分级标准,土壤养分块金效应为 25% ~ 75%,属于中等相关,表明土壤养分的空间变化是结构性因素(如土壤形成因素)和随机性因素(施肥耕作等措施)共同作用的结果。

变程反映土壤性状的空间相关有效距离。在变程内,养分之间存在一定的相关关系,反之则相互独

立。研究区土壤各养分指标的空间自相关距离差异较大,为272~2110 m,说明影响土壤养分含量的因子在不同尺度发挥作用;其中有机质、碱解氮和速效磷的变程较大,为869~2110 m。速效钾的变程较小,为272 m。

3.2.2 土壤养分空间分布特征 根据半方差分析结果,采用 Kriging 法对研究区各土壤养分指标进行内插,绘制各土壤养分含量的空间分布(图3)。研究区碱解氮含量在空间上呈现出由东南向西北逐渐降低的趋势,总体处于中等偏上或中等偏下水平,达到丰富水平的面积仅占总面积的5.49%,土地利用方式主要为农田。速效磷含量在空间上呈现出由东

南向西北逐渐递减的趋势,北部最低,速效磷含量大部分区域处于中等偏上及以上水平。速效钾含量在空间上呈现出南部高、北部低、中部偏东高的分布规律;对最高值区域进行实地考察,该处存在人工围堰,土壤水分饱和,植被长势良好;速效钾含量水平差异较大,总体处于中等偏上水平,达到极丰富水平的面积占到48.35%,说明研究区速效钾含量能够满足当季植物利用。有机质在空间上呈现东南高、北部低的空间分布特征,其含量处于中等偏上或中等偏下水平,并东南部邻近水库区域甚至达到丰富水平。据实地查勘,东南部土地利用方式以耕地和撂荒地为主,受施肥、耕作方式等人为影响较大。

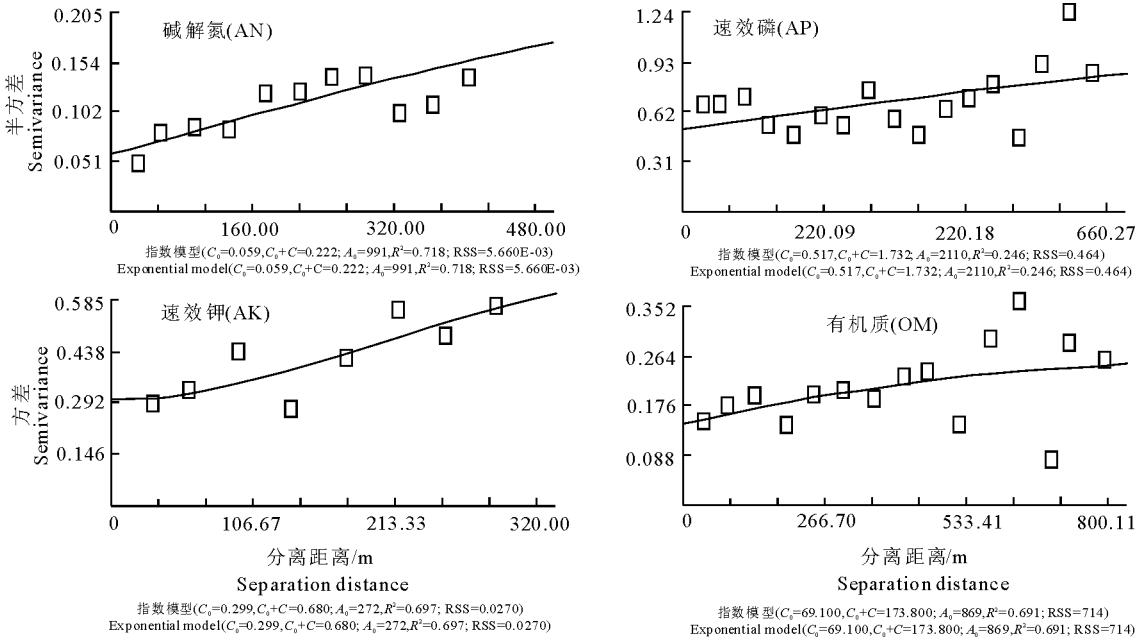


图2 土壤养分的半方差分析结果
Fig. 2 Semi-variogram analysis of soil nutrients

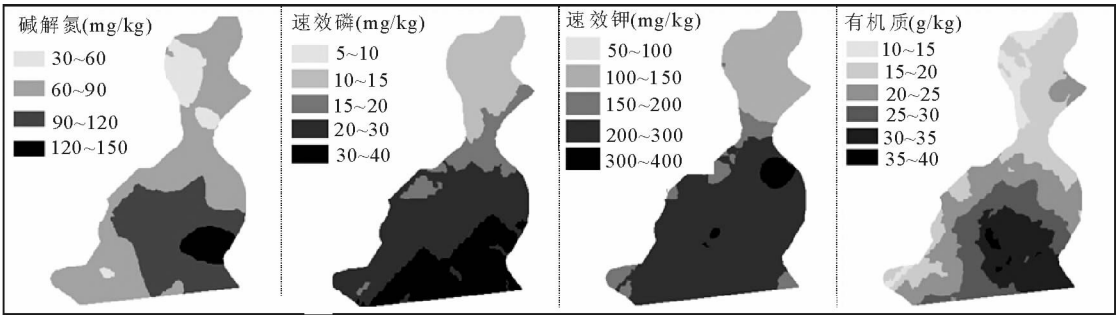


图3 研究区土壤养分空间分布特征
Fig. 3 Spatial distribution of soil nutrients in the study area

研究区土壤碱解氮与有机质含量在空间上具有相似的分布特征,主要是因为气候条件相似的情况下,由于耕作、施肥和水分等原因,造成东南部含量偏高,其他区域相对较低。东南区域相对于其他

区域,人类耕作活动较强,对土壤养分的影响较自然生态过程更为显著。在人为活动条件下,土壤有机质来源主要为作物根茬、秸秆还田、耕地利用等,施肥管理也会对有机质、氮和磷等含量造成一定影响。

4 结论

(1)土壤养分的传统统计表明,研究区土壤有机质处于中等偏上水平,碱解氮处于中等偏下水平,速效磷和速效钾分别达到丰富和极丰富的水平。地统计分析表明,研究区有机质和碱解氮含量处于中等偏上或偏下水平,速效磷和速效钾处于中等偏上及以上水平,两者分析结果基本一致,但后者可很好地反映土壤养分含量的结构性、随机性、独立性和相关性;

(2)研究区有机质含量符合或接近正态分布,碱解氮和速效钾经对数转换呈正态分布,具有较好的半方差结构。各养分块金效应表明,土壤养分受土壤母质、地形、气候等非人为因素和施肥、作物、管理水平等人为因素的共同作用。4种养分的空间自相关距离变程依次为:速效磷>碱解氮>有机质>速效钾;

(3)研究区有机质、碱解氮和速效磷含量在空间上呈现出由东南向西向北逐渐递减的趋势,但总体差异水平较小。速效钾中部偏东较高,向四周逐渐降低;

(4)人为作用影响下的土壤养分状况较自然生态过程的土壤养分好。在入库河口的生态修复中,新增淹没区的农田、撂荒地等可选择对土壤养分条件要求较高的植物种类。

参考文献

全国土壤普查办公室, 1979. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[M]. 北京: 农业出版社.

范夫静, 宋同清, 黄国勤, 等, 2014. 西南峡谷型喀斯特坡地土壤养分的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 25(1): 92-98.

范铭丰, 2010. 基于GIS的土壤养分空间变异特征及预测方法比较[D]. 重庆: 西南大学.

高玉蓉, 许红卫, 周斌, 2005. 稻田土壤养分的空间变异研究[J]. 土壤通报, 36(6): 822-827.

侯扶江, 肖金玉, 南志标, 2002. 黄土高原退耕地的生态恢复[J]. 应用生态学报, 13(8): 923-929.

胡艳霞, 周连第, 魏长山, 等, 2013. 水源保护地土壤养分空间变异特征及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 44(5): 1184-1191.

扈祥来, 2000. 甘肃省黄土高原丘陵地带森林植被对水资源的影响[J]. 水科学进展, 11(2): 199-201.

李德生, 张萍, 张水龙, 等, 2003. 黄前库区流域植被水源涵养功能及制备类型选择的研究[J]. 水土保持学报, 17

(4): 128-131.

李建辉, 李晓秀, 张汪寿, 等, 2011. 基于地统计学的北运河下游土壤养分空间分布[J]. 地理科学, 31(8): 1001-1006.

李秋华, 刘送平, 林陶, 等, 2011. 贵州某入库河口段水质改善工程的设计与分析[J]. 中国给水排水, 27(4): 47-53.

李思悦, 张全发, 2008. 南水北调中线丹江口库区主要生态环境问题及植被恢复[J]. 中国农村水利水电科学, (3): 1-4.

刘志鹏, 2013. 黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D]. 北京: 中国科学院大学.

马军, 2009. Excel 统计分析典型实例[M]. 北京: 清华大学出版社.

苗恒录, 吕志远, 郭克贞, 等, 2011. 毛乌素沙地土壤养分空间变异性初步研究[J]. 中国农村水利水电, (8): 83-85.

宋云, 李德志, 周燕, 等, 2009. 崇明三岛土壤主要养分的时空变异特征[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, (5): 85-92.

谭荣波, 梅晓仁, 2010. SPSS 统计分析实用教程[M]. 北京: 科学出版社.

万成炎, 马沛明, 常剑波, 等, 2009. 三峡水库生态防护带建设的初步探讨[J]. 长江科学院院报, 26(1): 9-11.

王彩绒, 吕家珑, 胡正义, 等, 2005. 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, 19(3): 17-20.

王军, 傅伯杰, 邱扬, 等, 2000. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数[J]. 地理学报, 55(4): 428-437.

张过师, 汤雷雷, 王利, 等, 2009. 丹江口库区土壤养分状况及空间变异研究——以丹江口市小茨苓村小流域为例[J]. 湖北农业科学, 48(12): 3007-3011.

张敏, 2010. 基于GIS与地统计学的土壤养分空间变异研究[D]. 郑州: 河南农业大学.

张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 等, 2013. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. 农业工程学报, 29(1): 93-101.

Berndtsson R, Bahri A, Jinno K, 1993. Spatial dependence of geochemical elements in a semiarid agricultural field: Geostatistical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 57: 1323-1329.

Cambardella C A, T B Moorman, J M Novak, et al, 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 58(5): 1501-1511.

(责任编辑 万月华)

Spatial Variation of Soil Nutrients in the Estuary Area of Danjiangkou Reservoir Region: Qingtang River Estuary Case Study

LEI Jun-shan^{1,2}, YIN Wei²

(1. College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P. R. China;

2. Changjiang water resources protection institute, Wuhan 430051, P. R. China)

Abstract: Estuaries provide the last protection against discharge of exogenous pollution into reservoirs and well vegetated estuary buffers effectively reduce exogenous pollutants. Increasing the height of the Danjiangkou Reservoir dam will inundate a portion of the estuaries and vegetation will be adversely affected. The biomass and productivity of vegetation is dependent on nutrients, so it is important to investigate the spatial distribution of soil nutrients in the estuaries before the additional impoundment to support restoration of the vegetation. For this purpose, a case study of the spatial variation of topsoil nutrients in the Qingtang River estuary area of Danjiangkou Reservoir was carried out using traditional descriptive statistics and geostatistical analysis. The study site selected was the newly inundated area created by dam heightening, with an area of 0.378 km² and an elevation of 147 – 175 m. Thirty-one soil samples (0 – 20 cm) were collected in six sampling strips running vertically to the river banks and with different soil uses. Soil samples were analyzed for pH, organic matter (OM) and the available nitrogen, phosphorous and potassium. The variation coefficient of soil nutrients ranged from 38.6% to 97.9%, displaying moderate variability except for available P. Soil nutrients also displayed moderate spatial autocorrelation in the study area with a spatial autocorrelation distance ranging from 272 m to 2 110 m and following the order, available P > available N > OM > available K. Mean values for OM ranged from 7.97 g/kg to 45.03 g/kg, higher than typical values, while mean values for available N ranged from 42.97 mg/kg to 178.70 mg/kg, below average levels. The mean values of available P ranged from 5.03 mg/kg to 121.40 mg/kg, and available K ranged from 62.50 mg/kg to 820.65 mg/kg, both at abundant levels. The OM, available P and available N displayed similar spatial distributions, decreasing gradually from southeast to west and north and maximum available K was observed in the east-central part of the study area. Compared with traditional descriptive statistics, the geostatistical analysis well reflected the constitutive properties, randomness, independence and correlation of soil nutrients. These results will support revegetation and ecological restoration in the Qingtang River estuary area of Danjiangkou Reservoir.

Key words: Danjiangkou Reservoir; soil nutrients; spatial variability; geostatistical analysis