艾比湖湿地土壤碱解氮的空间变异性分析①

艾尤尔·亥热提[1,2]，王勇辉[1,2]，海米提·依米提[1,2*]

(1 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室，乌鲁木齐 830054；2 新疆师范大学地理科学与旅游学院，乌鲁木齐 830054)

摘 要：选择艾比湖湿地的博尔塔拉河、精河下游河岸带为研究区域，针对土壤中的碱解氮进行定量测定，采用描述性统计法、地统计学方法和空间分析法，讨论研究区土壤碱解氮的空间变异及分布特征。结果表明：在 0 ~ 20、20 ~ 40 和 60 ~ 80 cm 土层碱解氮含量的块金值与基台值之比分别为 47.60%、49.98% 和 58.21%，具有中等的空间相关性。在 40 ~ 60 cm 和 80 ~ 100 cm 土层块金值与基台值之比分别为 3.64% 和 22.69%，具有较强的空间相关性。研究区 0 ~ 100 cm 各层土壤碱解氮含量平均值分别为 49.16、37.26、30.22、20.35 和 17.80 mg/kg，经统计分析 15 ~ 20 mg/kg 的样本频数最多，表明研究区碱解氮含量整体偏低，属于极缺乏性。土壤碱解氮垂直分异规律为：随土层深度的增加而递减；碱解氮含量水平分异规律为：博河区域＞精河及精河东部区域＞博、精河间的中部区域。

关键词：艾比湖；湿地；碱解氮；空间变异

中图分类号：s153.6^{+}1

湿地是介于陆地生态系统和水生生态系统之间的一种过渡类型，兼有陆生和水生生态的特点，是地球上生产力最高的生态系统之一[1]。湿地土壤是氮的重要储库，发挥着源、汇或转化器的重要功能[2]，其对于湿地系统诸生态过程有着重要影响。湿地土壤氮素是引发江河湖泊等永久性湿地发生富营养化的重要因子之一，是湿地营养水平重要指示物[3–4]。土壤碱解氮包括无机态氮(铵态氮、硝态氮)及易水解的有机态氮(氨基酸、酰胺和易分解的蛋白质)，易被植物吸收，是反映土壤供氮能力和衡量氮素水平高低的重要指标[5]，其在土壤中的含量与后作产量和吸氮量存在较显着的相关关系[6]。空间变异性是陆地生态系统土壤养分监测和建模的主要手段[7]。不同地点[8] 、不同尺度下[9–10]的土壤养分存在较强空间变异特征和明显的差异性。湿地土壤氮的空间分布特征不仅可反映出湿地土壤的养分供给状况及其可利用水平，而且还在一定程度上对湿地植物群落组成、湿地系统生产力以及湿地系统的稳定与健康等产生深刻影响[11–13]。目前有关湿润、半润地区的湿地土壤氮研究较多[14–19]，干旱区湖泊湿地土壤因子空间分布特征的研究较少[20–21]，尤其是在不同土壤剖面深度(即垂直方向)氮的空间变异性研究较少，因此干旱区湿地土壤氮的空间变化研究倍受关注。新疆艾比湖湿地作为干旱区湖泊湿地的典型代表，研究其土壤碱解氮的空间分布变异特征，可为干旱区湖泊湿地土壤氮素库间输移、湿地净化能力、湿地生产力以及湿地中氮素的生物小循环等研究奠定基础，也可为定量研究湿地生态功能和湿地修复与重建提供基础数据和理论支持。

本研究将地统计学和地理信息系统技术有机结合，研究了小尺度下土壤碱解氮的空间变异性，并利用 Kriging 法绘制研究区域不同层次土壤碱解氮质量分数分布图，了解它的分布规律，为大尺度预测湿地土壤碱解氮的含量提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

艾比湖位于我国西部边陲，地理位置 82°35′E，44°44′ ~ 45°10′N，地处欧亚大陆腹地，天山西段北麓，准噶尔盆地西南部，其北、西、南三面被高山阻隔。在新亚欧大陆桥上，湖面海拔约 195 m[22]，湖面面积约 1 200 km^2。艾比湖流域气候干燥，日照充足，蒸发量大，降水稀少，年均气温 8.3℃，年均降水量 200 mm 左右[23]，属北温带大陆性干旱气候。艾比湖流域为

①基金项目：国家自然科学基金项目(41171036)、国家自然科学基金重点项目新疆联合基金项目(U1138302)、新疆师范大学地理学博士点支撑学科项目(XJNU-DL-201411)资助。

* 通讯作者(hyimit@yahoo.com.cn)

作者简介：艾尤尔·亥热提(1990—)，男(维吾尔族)，新疆阿克苏人，硕士研究生，研究方向为干旱区湖泊环境与资源。E-mail：gheyur@163.com

典型的湿地生态环境，生物多样性资源丰富，是数百种动、植物生息繁衍的场所[24]。博尔塔拉河、精河是艾比湖主要补给河流，其变化直接牵动着艾比湖的动态变化，进而影响艾比湖流域。湿地土壤类型有灰棕漠土、灰漠土、灌耕土、潮土、草甸土、沼泽土、风沙土、盐土等，土壤分布既有典型的地带性，又具有明显的区域性。研究区内主要植被有柽柳(*Tamarix ramosissima*)、碱蓬(*Suaeda glauca Bunge*)、盐节木(*Chenopodiaceae*)、芦苇(*Phragmites australis*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum Murr*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)等[25]。

1.2 土壤样品的采集和制备

根据艾比湖湿地周边环境，按照代表性原则，在博尔塔拉河、精河下游共设 41 个剖面采样点，采用随机采样和重点抽样相结合的方法，每隔约 1 ~ 3 km 对典型植被覆盖的土壤进行采集。用不锈钢螺旋土钻，按 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm 5 个深度分层采集土壤样品，共获得土样 205 个，每样约 2.0 kg；采样同时各层分别取环刀样，带回实验室分析。采样时间为 2013 年 6 月，采样点进行 GPS 定位(图 1)，并详细记录采样点的植被类型、土壤类型、土地利用方式、经纬度坐标及高程等相关信息。野外采回的土样经自然风干后，剔除石块、植物根茎、人为侵入物等杂物，经过磨细，然后通过 60 目(孔径 0.25 mm)筛，混匀，装入纸袋，进行土壤碱解氮含量的测定。

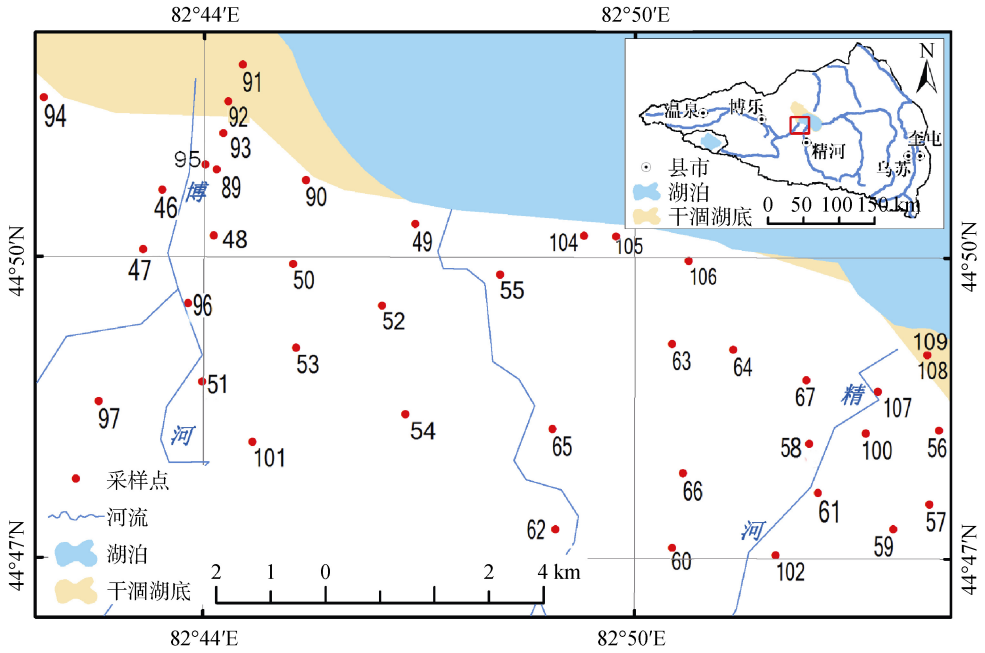

图 1 研究区土壤采样点分布图
Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 测定方法与数据处理

碱解氮测定采用碱解扩散法[26–27]，数据统计和相关性分析则采用 SPSS 19.0 软件，通过 MapGIS 和 ArcGIS 来进行投影转换和作采样图，采用+GS 9.0 软件来对数据进行半变异函数分析(semi variation function)空间化处理。

2 结果与讨论

2.1 描述性统计分析

对研究区各层次土壤进行统计学特征分析，得出土壤碱解氮的统计特征值(表 1)。结果表明：不同深度的土壤碱解氮含量依次为 0 ~ 20 cm＞20 ~ 40 cm＞40 ~ 60 cm＞60 ~ 80cm＞80 ~ 100 cm，从表层向下层呈现递减的趋势。研究区所有采样点的土壤碱解氮的取值范围为 6.04 ~ 107.81 mg/kg，差异很大。0 ~ 100 cm 各层含量最大值和最小值差异明显，表明土壤碱解氮存在本底差异。0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm 土层碱解氮含量平均值分别为 49.16、37.26、30.22、20.35 和 17.80 mg/kg，均值与中值都很接近，说明土壤碱解氮的分布比较均匀。此外，205 个土样碱解氮含量的频数直方图和正态分布曲线(图 2)表明：含量为 15 ~ 20 mg/kg 的样本频数最多，表明研究区碱解氮含量整体偏低，处于极缺乏水平。

表 1　土壤碱解氮的描述性统计表(mg/kg)
Table 1　Descriptive statistics of soil available N

土层(cm)	样本数	最小值	最大值	平均值	中值	标准差	变异系数(%)
0 ~ 20	41	13.66	107.81	49.16	49.95	24.52	49.87
20 ~ 40	41	6.07	88.97	37.26	33.30	20.30	54.48
40 ~ 60	41	6.04	73.10	30.22	28.70	15.13	50.06
60 ~ 80	41	9.04	36.50	20.35	21.13	5.78	28.40
80 ~ 100	41	8.80	50.20	17.80	17.65	7.27	40.84

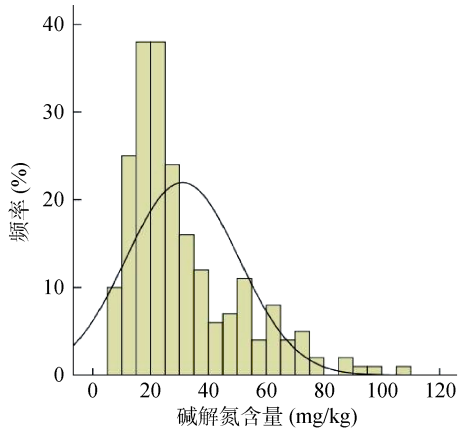

图 2　土壤碱解氮含量频数直方图
Fig. 2　Frequency histogram of soil available N

2.2　半方差函数分析

半方差函数是区域化变量在分隔距离上各样本变异的度量，并被证明是研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性自然现象的有效工具[28]。本研究对研究区土壤各层次进行 Kriging 插值，得到其具体的数据参数见表 2、图 3。表 2 是根据各层次碱解氮变异函数理论模型得出的相应参数，图 3 是各层土壤碱解氮的的变异函数图。块金值(C_0)通常表示由于试验误差和小于试验取样尺度引起的变异，较大的块金值表明较小尺度上的某种过程不容忽视，对于不同的土层而言块金值也存在一定的差异，基台值(C_0+C)表示系统总体的变异情况。从图 3 可以看出，所测的土壤碱解氮各土层半变异函数的总趋势：随着间隔距离的增加，半变异函数值也相应增加，然而到达一定距离后云图就趋向于某一平稳值，这表明，超出这个距离后，样点间不再具有相关关系。

从结构性因素来看，模型块金效应即 $C_0/(C_0+C)$ 反映变量空间变异的来源，比值越大表明人为随机性因素(灌溉、施肥、耕作等人为活动)的影响越明显；反之结构性因素(母质、气候、生物、地形等自然因素)的影响占主要地位[29]。块金效应小于 25%，说明系统具有强烈的空间相关性；块金效应为 25% ~ 75%，表明系统具有中等的空间相关性；块金效应大于 75%，说明系统空间相关性很弱[30–32]。土壤养分分布是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。一般研究认为，结构性因素可以导致土壤养分具有强的空间相关性，而随机性因素使得土壤养分的空间相关性减弱，朝均一化方向发展[33]。变程是指半方差函数达到基台值所对应的距离，反映土壤性状的空间相关有效距离。从表 2 可以看出，不同土层土壤碱解氮垂直变异的变程不同，变程依次为：60 ~ 80 cm＞20 ~ 40 cm＞0 ~ 20 cm＞80 ~ 100 cm＞40 ~ 60 cm，但均在 0.020 0 ~ 0.123 3 km 范围。以 40 ~ 60 cm 土层为例：碱解氮垂直变异的变程为 0.020 0 km，即在垂直方向 0.020 0 km 以内土壤碱解氮相关，可以通过插值进行预测，超过这个范围则不存在相关性。在 0 ~ 20、20 ~ 40 和 60 ~ 80 cm 土层碱解氮含量空间变异块金值与基台值之比分别为 47.60%、49.98%、58.21%，表明其空间变异性主要是随机性因素和结构性因素共同引起的，其空间分布为中等空间相关性；而在 40 ~ 60、80 ~ 100 cm 土层块金值与基台值之比分别为 3.64%、22.69%，表明其空间变异性主要是结构性因素引起，其空间分布相关性很强。

表 2　土壤碱解氮的半方差函数理论模型及相关参数
Table 2　Parameters and theoretical variogram models of soil available N

土层 (cm)	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$(%)	变程 (km)	决定系数 R^2
0 ~ 20	球状	302.000	634.400	47.60	0.0530	0.596
20 ~ 40	球状	200.600	401.300	49.98	0.0580	0.370
40 ~ 60	球状	8.800	241.800	3.64	0.0200	0.319
60 ~ 80	线性	27.233	46.786	58.21	0.1233	0.281
80 ~ 100	球状	10.900	48.030	22.69	0.0440	0.460

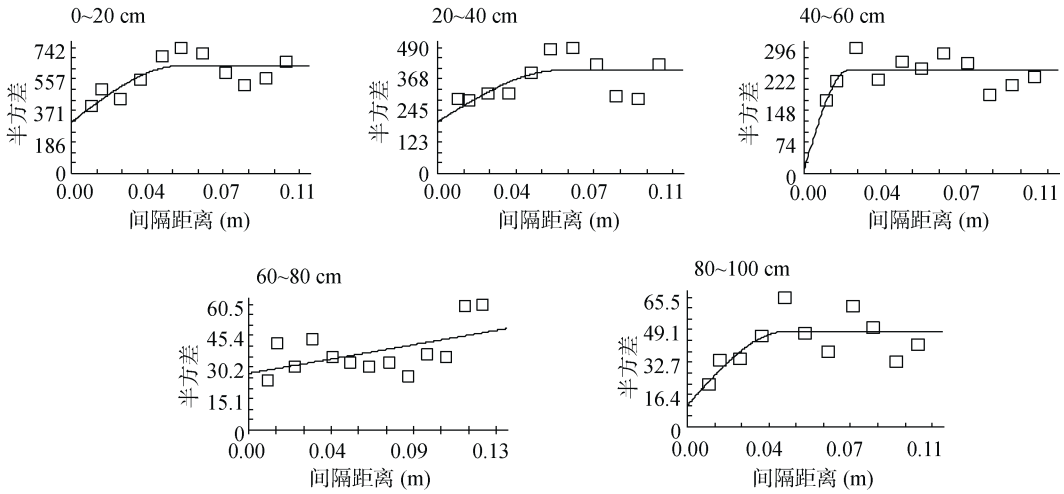

图 3 土壤碱解氮含量半方差函数图

Fig. 3 The semi-variance grams of soil available N

2.3 水平分布特征分析

艾比湖受到阿拉山口常年大风的影响，分布着大面积的风沙土，从整体上看碱解氮含量少，流动性强，处于极缺乏状态。通过 Kriging 插值方法作出的土壤各层次空间分布图(图 4)可以看出：研究区各层次碱解氮含量在总体上呈现斑块状分布，0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 土层高值区(30 ~ 64 mg/kg)主要分布在博河区域、精河及精河东部区域，低值区(13 ~ 30 mg/kg)主要分布在研究区的中部区域；60 ~ 80 cm 土层高值区主要分布在博河区域，低值区主要分布在研究区的中部、精河及精河东部区域；80 ~ 100 cm 土层博河区域碱解氮含量高于其他区域，但总体上整个研究区 80 ~ 100 cm 土层碱解氮含量较低(14 ~ 27 mg/kg)。分布上的差异与各区域植被类型和植被覆盖度有密切关系，枯枝落叶有助于土壤碱解氮的积累。博河区域多为盐生植被且长势较高较大主要植被类型有芦苇、碱蓬、柽柳、盐节木、芨芨草、黑果枸杞、梭梭、少量盐角草等，有些样点植被覆盖度最高达 60%(有些芦苇地盖度较大，远大于 60%)，最少不足 10%，平均每个样点覆盖度在 25% ~ 35%。精河附近和精河东部主要植被类型有芦苇、芨芨草、胡杨、柽柳、盐节木、盐角草等，有些样点植被覆盖度最

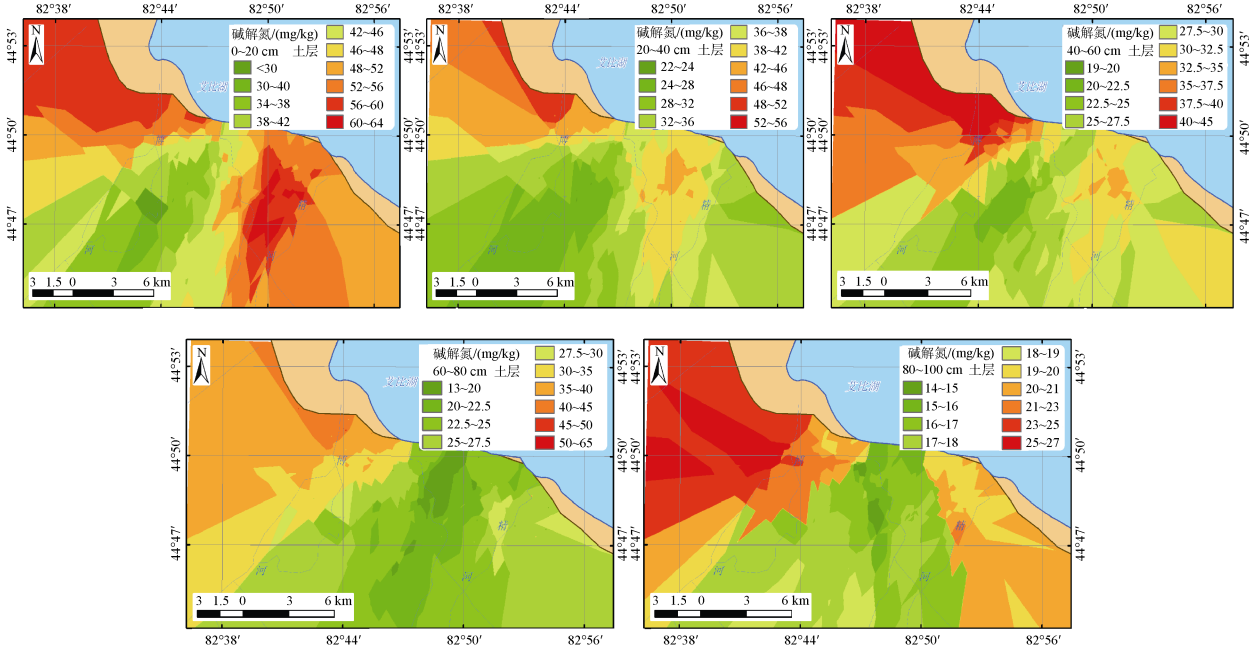

图 4 各层次土壤碱解氮空间分布图

Fig. 4 Spatial distributions of soil available N at all levels

高也不足 30%，最少不足 10%，有些甚至无植被，平均每个样点覆盖度在 10% ~ 30%。因此，植被类型多、覆盖度大的博河区域其碱解氮含量比其他区域高。

2.4　垂直剖面特征分析

图 5 为土壤碱解氮含量及其在剖面中的分布。该图显示：研究区土壤碱解氮含量随土层深度的增加平均含量呈递减趋势，依次为 0 ~ 20 cm＞20 ~ 40 cm＞40 ~ 60 cm＞60 ~ 80 cm＞80 ~ 100 cm，体现了植被对碱解氮等土壤养分的表聚作用。地表覆盖植被的根系深度、水分条件以及化学过程等密切影响土壤碱解氮的剖面分布。根系相对浅时，在近地表中吸收转移走的氮较多，造成该层各养分逐渐减少；根系较深时，在土壤深层吸收转移走的氮较多，表现出 60 ~ 100 cm 土层碱解氮逐渐减少[34]。下层土壤养分还可能受土体结构、性质以及成土母质基础的较大影响。变异系数是反映变量离散程度的重要指标，在一定程度上揭示了变量的空间分布特征。根据变异系数的大小土壤变异性可分为：<10% 为弱变异；10% ~ 100% 为中等变异；>100% 为强变异[35]。对研究区各层次土壤进行统计学分析(表 1，图 5)。结果表明，表层(0 ~ 20)、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm 的变异系数分别为 49.87%、54.48%、50.06%、28.40% 和 40.84% 均属于中等程度变异。

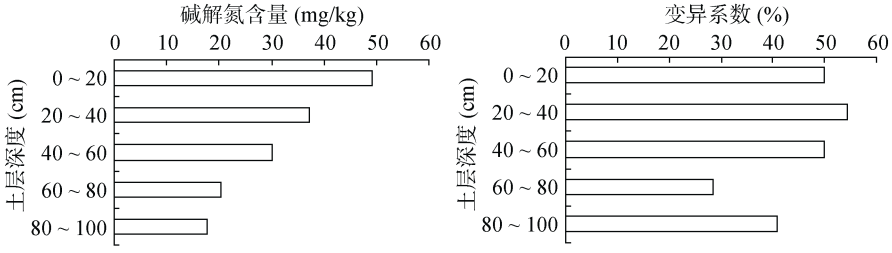

图 5　土壤碱解氮含量及其在剖面中的分布

Fig. 5　Soil available N content and its vertical variation in soil profile

3　结论

研究区 0 ~ 100 cm 土层碱解氮含量空间分布规律为：博河区域＞精河及精河东部区域＞博、精河间的中部区域。不同深度的土壤碱解氮含量依次为 0 ~ 20 cm＞20 ~ 40 cm＞40 ~ 60 cm＞60 ~ 80 cm＞80 ~ 100 cm，从表层向下层递减显著。在 0 ~ 20、20 ~ 40 和 60 ~ 80 cm 土层碱解氮含量块金值与基台值之比分别为 47.60%、49.98%、58.21%，具有中等的空间相关性，表明其空间变异性主要是随机性因素和结构性因素共同引起的。在 40 ~ 60、80 ~ 100 cm 土层块金值与基台值之比分别为 3.64%、22.69%，具有较强的空间相关性，表明其空间变异性主要是结构性因素引起的。

参考文献：

[1] 何勇田, 熊先哲. 试论湿地生态系统的特点[J]. 农业环境保护, 1994, 13(6): 275–278

[2] Mistch WJ, Gosselin JG. Wetlands[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 2000: 89–125

[3] 葛刚, 徐燕花, 赵磊, 吴志强, 吴兰. 鄱阳湖典型湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 619–622

[4] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 栾兆擎, 张玉霞. 霍林河流域湿地土壤碳氮空间分布特征及生态效应[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1 494–1 498

[5] 王瑞, 何中青, 丁建方, 田东, 朱文明. 洪泽湖农场土壤碱解氮含量的地统计学和 GIS 分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 3(31): 19 122–19 126

[6] 张智猛, 戴良香, 张电学, 常连生. 冬小麦-夏玉米轮作周期内碱解氮,硝态氮时空变化及施氮安全值的研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 38–42

[7] Rover M, Kaiser EA. Spatial heterogeneity within the plough layer: Low and moderate variability of soil properties[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(2): 175–187

[8] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤养分空间变异性的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39–44

[9] Huggett RJ. Soil chronosequences,soil development and soil evolution: a critical review[J]. Catena, 1998, 32(3): 155–172

[10] Trangmar BB, Yost RS, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties[J]. Advanced in Agronomy, 1985, 38: 44–54

[11] Vitousek PM, White PS. Process studies in succession[A] // West DC, Shugart HH, Botkin DB. Forest Succession: Concepts and Application[C]. New York: Springer-Verlag, 1981: 267–276

[12] Tilman D. The resource-ratio hypothesis of plant succession[J]. American Naturalist,1985, 125: 827–852

[13] 李贵才, 韩兴国, 黄建辉, 唐建维. 森林生态系统土壤氮矿化影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1 187–1 195

[14] 白军红, 崔保山, 杨志峰, 刘杰, 王庆改. 向海沼泽湿地土壤碱解氮含量的季节变化特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 115–117

[15] 白军红, 邓伟, 王庆改, 丁秋祎. 内陆盐沼湿地土壤碳氮磷剖面分布的季节动态特征[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 599–603
[16] 白军红, 邓伟, 张玉霞, 王国平. 洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 77–81
[17] 白军红, 邓伟, 张玉霞. 内蒙古乌兰泡湿地环带状植被区土壤有机质及全氮空间分异规律[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2): 145–151
[18] 杨继松, 于君宝, 刘景双, 王金达. 自然沼泽湿地开垦前后土壤中微量元素含量的变化[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(3): 374–379
[19] 孙志高, 刘景双, 于君宝. 三江平原小叶章湿地土壤中碱解氮和全氮含量的季节变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(8): 145–149
[20] 焦黎, 王勇辉, 张高, 樊洁. 艾比湖湖区土壤质地测定及其分析[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2007, 26(1): 74–77
[21] 闫培锋, 周华荣, 刘宏霞 .白杨河-艾里克湖湿地土壤理化性质的空间分布特征[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 406–412
[22] 谢宏琴, 贾国东, 彭平安, 穆桂金. 艾比湖二千年来环境演变的地球化学记录[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 205–209
[23] 王勇辉, 海米提·依米提, 胡江玲, 杨余辉. 干旱区湿地土壤有机质空间分布及关系研究—以艾比湖湿地为例[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 98–103
[24] 袁月, 傅德平, 吕光辉. 新疆艾比湖湿地植被优势种种间关系研究[J]. 湿地科学, 2008, 6(4): 486–491
[25] 王勇辉, 马蓓, 海米提·依米提. 艾比湖主要补给河流下游河岸带土壤盐分特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 196–202
[26] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 82–84
[27] 农业部全国土壤肥料总站. 土壤分析技术规范[M]. 北京: 农业出版社, 1993: 39–40
[28] 刘贤赵, 衣华鹏. 渭北旱塬土壤水分空间变异性[J]. 山地学报, 2004, 22(5): 521–527
[29] 盛建东, 肖华, 武红旗, 陈冰, 王军, 杨新建. 不同取样尺度农田土壤速效养分空间变异特征初步研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 63–67
[30] 吉力力·阿不都外力, 阿依古丽·买买提, 唐杨. 玛纳斯河流域绿洲土壤春季盐渍化研究[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 189–195
[31] 王华静, 宁龙梅, 徐留兴, 黄慧, 杜鹃. 川西北高寒地区土壤有机碳含量垂直分布特征[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 76–80
[32] 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土. 黄河口不同生境下翅碱蓬湿地土壤碳氮储量与垂直分布特征[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1 444–1 449
[33] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 陈利顶, 杨福林. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究—以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557–563
[34] 王勇辉, 陈升, 焦黎. 艾比湖主要补给河流下游河岸带土壤养分特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 43–47
[35] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 邹平. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 61–66

Spatial Variability of Soil Available Nitrogen in Ebinur Lake Wetland

Ghayur·GHAYRAT[1,2] ,WANG Yong-hui[1,2], Hamit·YIMID[1,2*]

(1 *Key Laboratory of Arid Lake Environment and Resources*, *Urumqi* 830054, *China*; 2 *Geographic Science and Tourism Faculty of Xinjiang Normal University*, *Urumqi* 830054, *China*)

Abstract: In this paper, the riparian zone of Bortala River and Jinghe River of Ebinur Lake wetland was selected as a study area, soil available N content was measured and the spatial variation and distribution characteristics of soil available N in the study area were discussed by the method of descriptive statistics, statistical methods and spatial analysis. The results showed that: the spatial correlation of soil available N in the depths 0–20cm, 20–40cm and 60–80cm were moderately dependent, with the Nugget/Sill of 47.60%,、49.98% and 58.21%, respectively; soil available N in the depths of 40–60cm and 80–100cm were highly dependent, with the Nugget/Sill of 3.64% and 22.69%, respectively; within the range of 0–100cm soil depth, the average value of soil available N in each layer (0–20cm, 20–40cm, 40–60cm, 60–80cm and 80–100cm) were 49.16 mg/kg, 37.26 mg/kg, 30.22 mg/kg, 20.35 mg/kg and 17.80 mg/kg, respectively; the frequency of soil available N content in study area mostly ranged between 15–20 mg/kg, which showed the overall level of soil available N content was low, belonging to extremely deficient level; soil available N decreased with the increase of soil depth. Horizontal distribution rules of soil available N content was: Bortala River＞Jinghe River and eastern region of Jinghe River＞central area between Bortala and Jinghe Rivers.

Key words: Ebinur lake, Wetland, Available N, Spatial variability