

# 黄河三角洲典型潮滩湿地土壤硝态氮和 铵态氮的空间分布特征

牟晓杰<sup>1,2,3</sup>, 孙志高<sup>2</sup>, 刘兴土<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所 湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130102;  
2. 中国科学院 烟台海岸带研究所 海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 运用地统计学方法研究了黄河口滨岸潮滩湿地土壤中硝态氮和铵态氮的空间分布格局。结果表明, 潮滩湿地土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的水平变异性在不同土层差异较大, 较高的水平变异性主要与其在潮滩湿地良好水分条件下较为活跃的物理运移特性有关; 潮滩湿地表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的水平分布具有明显的空间结构, 符合高斯模型, 并具有中等程度的空间相关性; 自然结构因素在引起  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  空间异质性中的贡献占优, 随机因素的影响相对较小; 表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的空间变异性以向低潮滩延伸且受潮汐涨落影响较大的方向最大; 潮滩湿地表层土壤的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  具有明显的空间分布格局, 表现出向低潮滩延伸方向形成明显斑块低值区, 边缘则形成斑块高值区的特征。微地貌特征和潮汐微域物理扰动强度是导致空间异质性的两个重要随机因素, 而水盐条件、土壤类型和潮汐物理扰动是 3 个重要结构因素。

**关键词:** 黄河三角洲; 潮滩湿地; 硝态氮和铵态氮; 空间分布

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0256-05

中图分类号: S158, Q145

## Spatial Distribution Patterns of Nitrate Nitrogen and Ammonia Nitrogen in Typical Tidal Marsh Soils of Yellow River Delta

MOU Xiao-jie<sup>1,2,3</sup>, SUN Zhi-gao<sup>2</sup>, LIU Xing-tu<sup>1</sup>

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130102, China*; 2. *Key Laboratory of Coastal Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Spatial distribution patterns of nitrate nitrogen and ammonia nitrogen were studied in the tidal marsh soils of the Yellow River Delta by geo-statistical methods. The results showed that the  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  contents had significant horizontal variability in different soil layers, which was mainly correlated with their active physical transport characteristics caused by the better water conditions in the tidal marsh. The horizontal distribution of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in topsoil displayed significant spatial structure, which can be best fitted with Gaussian model and had moderate spatial correlation. The natural structure factors had significant effects on the spatial variability, while the effects of random factors were relatively low. The maximum spatial variability of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in topsoil was observed in the direction extending towards the low tidal marsh, showing a great effect by the ebbs and flows of tide. The spatial distribution patterns of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  in topsoil were significant. The low  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  contents in topsoil were generally observed on the sites close to low tidal marshes, while the high values appeared on the edges of the study area. This study indicated that micro-physiognomy characteristics and tidal micro-domain physical disturbance were the two most important random factors inducing spatial heterogeneity, while water and salinity conditions, soil types and tidal circulation were three important structure factors.

**Keywords:** Yellow River Delta; tidal marsh; nitrate nitrogen and ammonia nitrogen; spatial distribution pattern

收稿日期: 2011-09-25

修回日期: 2012-01-04

资助项目: 国家自然科学基金“黄河口生态恢复工程对湿地氮循环关键生物地球化学过程的影响”(41171424); 山东省自然科学基金重点项目(ZR2010DZ001); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05030404); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项经费项目子课题(2012418008-3); 中国科学院人才专项(青年创新促进会)

作者简介: 牟晓杰(1982—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 博士研究生, 主要从事湿地生物地球化学研究。E-mail: xjmou@163.com。

通信作者: 孙志高(1979—), 男(汉族), 山东省烟台市人, 博士, 副研究员, 主要从事湿地生物地球化学研究。E-mail: zgsun@yic.ac.cn。

湿地作为氮的源、汇或转化器,对全球氮循环及平衡有着非常重要的环境意义。滨海湿地处于海洋和陆地的交错地带,同时受到海洋和陆地作用力的共同影响,对外界胁迫压力反应敏感,是一个脆弱的边缘地带<sup>[1]</sup>,目前已成为全球变化研究的理想区域<sup>[2]</sup>。湿地土壤氮的空间分布格局显著影响着湿地的诸多生态过程,是研究元素行为微观过程的基础<sup>[3]</sup>。不同类型湿地土壤的肥力具有很大差异,即使在同一湿地内,土壤肥力也是不均一的,具有高度的空间异质性<sup>[4]</sup>。目前,国内外关于湿地土壤氮的空间分布格局已有一些相关研究,且这些研究主要集中在湿地土壤氮的垂直分布特征上<sup>[5-10]</sup>,而关于湿地土壤氮的水平分布格局在淡水沼泽湿地<sup>[3,11-12]</sup>和河流湿地<sup>[5]</sup>也开展了一些相关研究,但目前关于潮滩湿地土壤硝态氮和铵态氮空间分布特征的相关研究还不多见。

黄河三角洲由黄河携带大量泥沙填充渤海淤积而成,是中国暖温带保存最完整,最广阔和最年轻的湿地生态系统。当前,国内关于黄河三角洲湿地生源元素循环的相关研究还不多见,且现有研究多集中在湿地植物元素累积与分配特征<sup>[13-14]</sup>,湿地土壤元素剖面分布特征<sup>[15-17]</sup>,湿地温室气体排放<sup>[18]</sup>等方面的探讨上,而关于潮滩湿地土壤中硝态氮和铵态氮水平空间分异特征的研究还未见报道。本研究以黄河口滨岸潮滩湿地为研究对象,运用地统计学方法探讨了潮滩湿地土壤中硝态氮和铵态氮的空间分布特征,研究结果不仅为河口湿地氮生物地球化学循环研究提供基础数据,而且还可为湿地生态系统的保护与管理以及退化湿地的恢复与保育等提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究样地位于山东省黄河三角洲国家级自然保护区(37°40′—38°10′N, 118°41′—119°16′E)今黄河入海口北部的滨岸潮滩湿地。黄河三角洲国家级自然保护区于 1992 年经国家林业局批准建立,是全国最大的河口三角洲自然保护区,在世界范围河口湿地生态系统中具有较强的代表性,主要保护黄河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类。保护区总面积 1.53 × 10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>,其中核心区面积 5.80 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,缓冲区面积 1.30 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,试验区面积 8.20 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>。保护区属暖温带季风气候区,具有明显的大陆性季风气候特点,雨热同期,四季分明,冷热干湿界限极为明显。春季干旱多风,常有春旱,夏季炎热多雨,高温高

湿,时有台风侵袭。该区年平均气温 12.1 °C,无霜期 196 d, ≥10 °C 的积温约 4 300 °C,年均蒸发量 1 962 mm,年均降水量为 551.6 mm,70% 的降水集中于 7—8 月份。保护区的土壤类型主要为隐域性潮土和盐土,主要植被类型为芦苇(*Phragmites australis*)群落、芦苇—荻(*Miscanthus sacchariflorus*)群落、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)群落、柽柳(*Tamarix chinensis*)群落、翅碱蓬(*Suaeda salsa*)群落及补血草(*Limonium sinense*)群落等,其中芦苇群落、柽柳群落及翅碱蓬群落分布较广。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与测定 2009 年 5 月,在今黄河入海口北部中潮滩与低潮滩过渡带的翅碱蓬分布区内,设置典型研究样区(样区约 70% 面积(I 分区)位于中潮滩,约 30% 面积(II 分区)位于低潮滩过渡带),并沿东—西方向随机建立 100 m × 150 m 的取样小区(坡度 < 3°),在样区内均匀设置 10 m × 20 m 的采样网格,并于网格交叉点处采集土壤样品。土壤采样深度为 20 cm,每 10 cm 为 1 层,共采集样品 160 个,其中 I 分区 112 个,II 分区 48 个。将采集的土壤样品及时带回实验室自然风干后,捡去残根等杂物,用球磨机磨碎,过 100 目筛后装袋待测。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在用 2 mol/L 的 KCl 浸提后通过连续流动分析仪(Bran-Lubee AAA3)测定。

1.2.2 半方差变异函数模型 湿地土壤养分为区域化变量,同时具有随机性和结构性(空间自相关性)特征<sup>[19]</sup>,当土壤养分变量满足二阶平稳和本征假设,且样本空间足够大时,其半方差理论变异函数  $r(h)$  的计算式为<sup>[20]</sup>:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2$$

式中: $h$ ——两样点的空间距离; $r(h)$ ——所有空间相距  $h$  的点对的平方均差; $N(h)$ ——在空间上具有相同间隔距离  $h$  的点对数目; $Z(x_i), Z(x_i+h)$ ——区域化变量  $Z(x)$  在空间位置  $x_i$  和  $x_i+h$  处的实测值 [ $i=1, 2, \dots, N(h)$ ]。 $r(h)$  反映了不同距离间的方差变化,可用于揭示区域化变量在整个尺度上的空间变异格局。 $r(h)$  通常包括块金值( $C_0$ ),基台值( $C_0+C$ ),变程( $a$ )和分形维数( $D$ )这 4 个重要参数<sup>[20]</sup>。

### 1.3 数据处理与分析

运用 SPSS 10.0 和 Origin 7.5 等软件对数据进行 Kolmogorov—Smirnov(K—S) 正态检验和基本统计分析,运用地统计学软件包 GS+ for windows 5.1 进行半方差函数  $r(h)$  的计算,运用 Surfer 7.0 软件进行克里格内插局部估计。

## 2 结果与分析

### 2.1 统计分析与正态分布检验

表 1 为潮滩湿地不同土层中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的描述性统计结果。由表 1 可知,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  平均含量均自表层向下略有增加。二者的水平变异性在不同土层差异较大, 除 0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的水平变异性 (39.02%) 略低于 10—20 cm 土层 (41.15%) 外,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的水平变异性自表层向下呈显著降低趋势。比较而言, 0—10 cm 土层的水平变异性表现为:  $\text{NH}_4^+ - \text{N} > \text{NO}_3^- - \text{N}$ , 10—20 cm 土层则表现为:  $\text{NO}_3^- - \text{N} > \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  较高的水平变异性主要与二者在潮滩湿地良好水分条件下较为活跃的物理运移特性有关。方差分析表明,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量在不同土层中的差异未达到显著水平 ( $p > 0.05$ ), 而  $\text{NO}_3^- - \text{N}$

含量的差异则达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。

半方差函数通过区域化变量分割等距离样点间的差异来研究变量的空间相关性和空间结构。进行空间相关分析的变量必需满足正态分布, 并且由随机抽样的方式而获得。数据的非正态分布会使方差函数产生比例效应, 抬高基台值和块金值, 降低估计精度, 使某些潜在特征表现不明显, 甚至会掩盖其固有的结构<sup>[21]</sup>。为了检验试验数据是否符合半方差函数分析的条件, 采用 Kolmogorov—Smirnov (K—S) 正态分布检验概率 ( $P_{K-S}$ ) 对其进行检验。检验时取显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 若  $P_{K-S} > 0.05$ , 则认为数据服从正态分布。由表 1 可知, 0—10 cm 土层的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  以及 10—20 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的  $P_{K-S}$  均小于 0.05, 不能用于空间分析, 而 0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的  $P_{K-S}$  大于 0.05, 表现为明显的正态分布, 可进行空间相关分析。

表 1 研究区不同土层硝态氮和铵态氮的描述性统计结果

土层深度/cm	项目	均值/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	标准差/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	变异系数/ %	最大值/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	最小值/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	偏度 $S_k$	峰度 $K_u$	$P_{K-S}$
0—10	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	3.63	1.42	39.02	8.72	1.49	0.928	0.420	0.086
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	11.41	5.86	51.39	42.33	4.20	2.012	3.600	0.009
10—20	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	4.20	1.73	41.15	12.34	2.06	1.767	2.822	0.002
	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	13.11	5.22	39.85	38.98	6.02	2.069	3.851	0.021

### 2.2 湿地土壤硝态氮的空间异质性

2.2.1 各向同性下硝态氮的空间结构性 区域化变量的结构分析是以  $r(h)$  模型为基础, 这是  $r(h)$  的主要功能之一。高斯模型的空间相关性也随距离增加而衰减, 且相关性亦消失于无限远处。

表 2 和图 1 为潮滩湿地表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在各向同性下的变异函数理论模型及相关参数。从表 2

可知, 表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的基台值远远大于块金值, 表明其在全方向上具有明显的空间结构, 其半方差函数与步长  $h$  的关系符合高斯模型。

决定系数  $R^2$  和 RSS 是用来说明模型对被研究对象的解释效率。从表中可知, 表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的半方差函数理论模型的解释效率较高, 均在 93% 以上。

表 2 各向同性下的变异函数理论模型及参数

理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	块金/基台 $C/(C_0 + C)$	变程 $a$	决定系数 $R^2$	残差 RSS	分维数 $D$
高斯模型	1.69	5.39	0.686	259.40	0.931	0.03	1.939

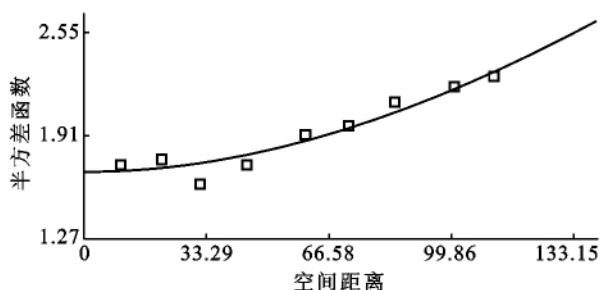


图 1 湿地表层 (0—10 cm) 土壤中硝态氮各向同性半方差函数

区域化变量的空间异质性  $\text{SH}_Z$  由两部分组成, 即  $\text{SH}_Z = \text{SH}_R$  (随机误差引起) +  $\text{SH}_A$  (空间自相关引起)。块金值  $C_0$  表示随机部分的空间异质性, 而  $C$  表示空间自相关部分引起的空间异质性, 所以基台值  $C_0 + C$  就表示区域化变量的最大变异。基台值越大, 区域化变量的空间异质性越高。  $C/(C_0 + C)$  反映了结构因素  $\text{SH}_A$  对空间异质性  $\text{SH}_Z$  的贡献程度, 而  $C_0/(C_0 + C)$  则反映了随机部分  $\text{SH}_R$  引起的空间异质性占总空间异质性  $\text{SH}_Z$  的比例。由表 2 可知,

$\text{NO}_3^- - \text{N}$  的  $C/(C_0 + C)$  值较高, 结构因素对于其空间异质性的贡献率为 68.6%。按照区域化变量空间相关性程度的分级标准<sup>[22]</sup>, 当  $C_0/(C_0 + C) < 25\%$  时, 变量具有强烈的空间相关性; 当  $25\% \leq C_0/(C_0 + C) \leq 75\%$  时, 变量具有中等程度的空间相关性; 当  $C_0/(C_0 + C) \geq 75\%$  时, 变量的空间相关性很弱。表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的  $C_0/(C_0 + C)$  值为 31.4%, 介于 25%~75% (表 2), 说明其具有中等程度的空间相关性。总的来说, 在各向同性结构下, 自然结构因素如气候、母质、水分、盐分、地形、土壤类型和潮汐物理扰动等在引起表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  总空间异质性的贡献起主导作用(68.6%), 而随机因素对其的影响相对较小(31.4%)。研究样地影响  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  总空间异质性的随机因素主要与微地貌特征, 不同土层微域水盐条件及其引起的溶质运移、潮汐微域物理扰动强度、有机氮矿化以及植物根系分布与吸收作用等过程有关。

变程  $a$  可较好地反映区域化变量的空间影响范围。由表 2 和图 1 可知, 0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的变程(259.40 m) 很大, 说明其在较长距离内存在空间结构异质性, 而当超过相应变程时, 区域化变量的空间相关性消失。分维数  $D$  的大小可表示变异函数的曲率, 而  $D$  值之间的比较可以确定空间异质性的程度<sup>[23]</sup>。一般而言,  $D$  值越大, 其所表现的空间分布越

复杂。由表 2 可知, 0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的  $D$  值较大(1.939), 说明表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的分布非常复杂。

2.2.2 各向异性下硝态氮的空间结构性 为了研究表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的半方差函数在不同方向上的特点, 即各向异性, 对不同方向的半方差函数进行了计算。计算时将全方位平均分为 4 个角度,  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$  分别代表东—西, 东北—西南, 南—北, 西北—东南方向。表 3 为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在各向异性下的变异函数理论模型及相关参数。从表 3 可知, 表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的基台值均远大于块金值, 表明其在不同方向上具有明显的空间结构, 其半方差函数与步长  $h$  的关系符合高斯模型。从  $R^2$  和 RSS 对模型解释的效率可知, 表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的半方差函数理论模型的解释效率相对较低, 在 50% 左右。另外, 通过分析表 3 中的  $C/(C_0 + C)$  值可知,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在各方向上的空间变异程度较高(0.693), 与各向同性基本一致(表 2)。而从区域化变量空间相关程度的分级来看, 0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的  $C_0/(C_0 + C)$  值为 30.7%, 说明其具有中等程度的空间相关性, 这与前面在各向同性下的研究结果相一致。总之, 在各向异性结构下, 自然结构因素对于  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的空间异质性起主导作用, 这也与在各向同性下分析的结果相一致。

表 3 各向异性下变异函数理论模型及参数

项目	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	块金/基台 $C/(C_0 + C)$	变程 $a_1$	变程 $a_2$	决定系数 $R^2$	残差 RSS
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	高斯模型	1.68	5.46	0.693	257.50	255.80	0.515	3.23

图 2 表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在 4 个方向上的半方差变异函数。从图 2 可知, 0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的变程在各方向上不尽一致, 但差异不大, 存在一定的空间异质性结构特征, 其空间变异尺度整体以东—西方向( $0^\circ$ ) 最大, 而南—北方向( $90^\circ$ )、东北—西南方向( $45^\circ$ ) 和西北—东南方向( $135^\circ$ ) 较大且一致, 其半方差函数符合高斯模型, 表现出与全方向相似的空间相关性和变异特征。上述分析表明,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在 4 个方向上的空间变异尺度均是以东—西方向最大, 而研究样地的东—西方向整体上又是向低潮滩延伸且受潮汐涨落影响较大的方向, 这说明样地微地貌特征、潮汐微域物理扰动强度及其引起的不同土层微域水盐条件和溶质运移的差异可能是导致  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  空间异质性的两个重要随机因素。同时沿着样地东—西方向由于潮汐作用形成一个明显的水盐梯度带, 又因研究样区约 70% 的面积(I 分区) 位于中潮滩, 约 30% 的面积(II 分区) 位于低潮滩, 水盐梯度带的存在会导

致位于不同分区潮滩湿地土壤的理化性质存在明显差异(表 4)。而且 II 区由于受潮汐的影响较大, 所以土壤中较好的水分条件使得其  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  更易发生水平运移而被潮水带走或被垂直淋失到深层土壤中。可见, 水盐条件、土壤类型和潮汐物理扰动可能是导致表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  空间异质性的 3 个重要结构因素。

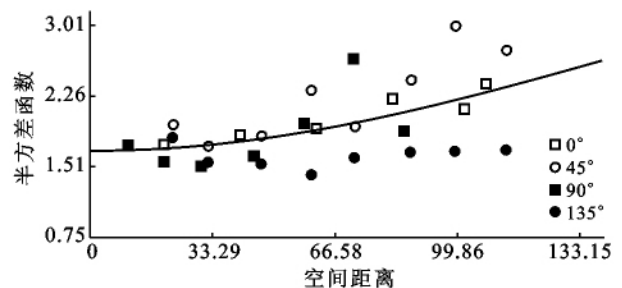


图 2 湿地表层(0—10 cm)的土壤中硝态氮的各向异性半方差函数

表 4 两个分区不同土层理化性质对比

样区	土层/cm	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	含水量/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	电导率/ ( $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	pH 值	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{NO}_3^- - \text{N}/$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
I 区 ( $n=56$ )	0—10	$1.30 \pm 0.01$	$42.80 \pm 1.20$	$11.52 \pm 2.29$	$7.75 \pm 0.06$	$11.88 \pm 4.61$	$3.76 \pm 1.39$
	10—20	$1.38 \pm 0.02$	$43.97 \pm 1.03$	$9.83 \pm 0.94$	$7.68 \pm 0.05$	$13.48 \pm 6.09$	$4.07 \pm 1.85$
II 区 ( $n=24$ )	0—10	$1.47 \pm 0.02$	$46.66 \pm 0.87$	$7.85 \pm 0.75$	$8.30 \pm 0.16$	$10.31 \pm 8.10$	$3.32 \pm 1.46$
	10—20	$1.52 \pm 0.01$	$45.08 \pm 1.14$	$6.96 \pm 0.84$	$8.28 \pm 0.12$	$12.24 \pm 2.00$	$4.52 \pm 1.39$

注:表中数据为均值±标准差(Mean±SD)。

### 2.3 硝态氮的水平分布格局

图 3 为潮滩湿地表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的空间分布特征。据图 3 可知,表层土壤的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量沿样地东—西方向(向低潮滩延伸方向)形成明显的斑块低值区,边缘形成斑块高值区,原因主要与微地貌特征、潮汐微域物理扰动引起的微域水盐条件和溶质运移等随机因素以及 I, II 分区水盐条件、土壤类型和潮汐物理扰动及其引起的较大范围水盐条件和溶质运移等结构因素共同作用的结果有关。由于  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  更易于在水分条件较好的 II 分区发生垂直淋失至土壤深层或水平运移而被潮水带走,因而形成斑块低值区。另外,研究样地  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  高值区和低值区的形成还与 I, II 分区的水分变化频繁这一重要因素有关。水分变化频繁可通过影响土壤的氧化还原状况及微生物群落的交替,进而影响着有机质的分解和腐殖化过程,而这些过程又影响着湿地氮的持留能力。已有研究表明<sup>[24]</sup>,较短的水分变化周期将有利于湿地脱氮,而长期淹水或较长水分变化周期则不利于湿地脱氮。Verhoeven 等<sup>[25]</sup>的研究也表明,湿地在水分变化频繁条件下的脱氮作用较长期淹水条件下强的多。研究样地的 II 分区处于低潮滩边缘,由于经常受潮汐影响而使得其水分变化较 I 分区频繁,因此其脱氮作用也较 I 分区强的多,而这也是导致表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在 II 分区出现斑块低值区的重要原因之一。

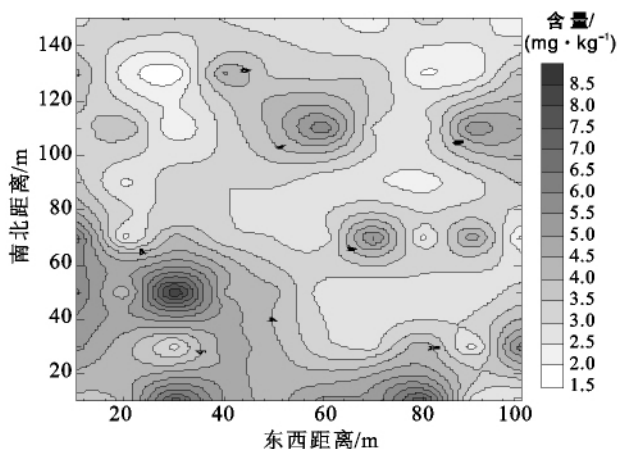


图 3 湿地表层(0—10 cm)土壤硝态氮的空间分布特征

## 3 结论

(1) 潮滩湿地土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的水平变异性在不同土层差异较大,表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的水平变异性略低于 10—20 cm 土层,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的水平变异性自表层向下则呈显著降低趋势。0—10 cm 土层的水平变异性表现为:  $\text{NH}_4^+ - \text{N} > \text{NO}_3^- - \text{N}$ , 10—20 cm 土层表现为:  $\text{NO}_3^- - \text{N} > \text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 二者较高的水平变异性主要与其在湿地良好水分条件下较为活跃的物理运移特性有关。

(2) 潮滩湿地表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的水平分布具有明显空间结构,符合高斯模型;自然结构因素在引起其空间异质性中的贡献占优;表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在 4 个方向上的空间变异性以向低潮滩延伸且受潮汐涨落影响较大方向最大;微地貌特征和潮汐微域物理扰动强度是导致空间异质性的两个重要随机因素,而水盐条件、土壤类型和潮汐物理扰动是 3 个重要结构因素。

(3) 潮滩湿地表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  具有明显空间分布格局,表现出向低潮滩延伸方向形成明显斑块低值区,边缘形成斑块高值区的特征。原因与微地貌特征、潮汐微域物理扰动引起的微域水盐条件和溶质运移等随机因素以及不同位置水盐条件、土壤类型和潮汐物理扰动及其引起的较大范围水盐条件和溶质运移等结构因素的共同作用有关;水分变化频繁是导致表层土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在向低潮滩延伸方向形成明显斑块低值区的重要原因。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Levenson H. Coastal systems: On the margin[C]// Bolt-on H S, ed. Coastal Wetlands. New York: American Society of Civil Engineers, 1991.
- [2] Simas T, Nunes J P, Ferreria J G. Effects of global climate change on coastal salt marshes[J]. Ecological Modelling, 2001, 139(1): 1-15.
- [3] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 向海沼泽湿地土壤氮素的空间分布格局[J]. 地理研究, 2004, 23(5): 614-622.
- [4] 傅国斌, 李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进

- 展[J]. 地理研究, 2001, 20(1): 120-128.
- [5] 白军红, 邓伟, 朱颜明, 等. 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): 1494-1498.
- [6] 赵如金, 高晶, 王晓静, 等. 北固山湿地土壤氮磷及重金属空间分布[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 10-12.
- [7] 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 293-297.
- [8] 孙志高, 刘景双, 牟晓杰. 三江平原小叶章湿地土壤中硝态氮和铵态氮含量的季节变化特征[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(3): 277-282.
- [9] 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.
- [10] 白军红, 邓伟, 张玉霞. 莫莫格湿地土壤氮磷空间分布规律研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 79-81.
- [11] 孙志高, 刘景双, 陈小兵. 三江平原典型小叶章湿地土壤中硝态氮和铵态氮的空间分布格局[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 66-72.
- [12] Bai Junhong, Wang Qinggai, Gao Haifeng, et al. Spatial and temporal distribution patterns of nitrogen in marsh soils from an inland alkaline wetland: A case study of Fulaowenpao wetland, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 210-215.
- [13] 牟晓杰, 孙志高, 王玲玲, 等. 黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬氮的累积与分配特征[J]. 湿地科学, 2010, 8(1): 57-66.
- [14] 牟晓杰, 孙志高, 王玲玲, 等. 黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬 K, Ca, Mg 含量与累积的季节变化[J]. 草业学报, 2010, 19(3): 177-190.
- [15] 董洪芳, 于君宝, 孙志高, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地植物—土壤系统有机碳空间分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1594-1599.
- [16] 孙万龙, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤磷、硫的分布特征[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 104-109.
- [17] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1439-1445.
- [18] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩湿地 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量特征初步研究[J]. 草业学报, 2010, 20(3): 51-61.
- [19] 孙志高, 刘景双, 姜艳艳, 等. 基于地统计学和<sup>15</sup>N 技术的湿地土壤氮素空间运移理论探讨[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 347-351.
- [20] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [21] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [22] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: The semivariogram and punctual Kriging[J]. Soil Science, 1980, 31(2): 315-341.
- [23] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [24] Groffman P M, Hanson G C, Erick K, et al. Variation in microbial biomass and activity in four different wetland types[J]. Soil Science Society of American Journal, 1996, 60(2): 622-629.
- [25] Verhoeven J T A, Whigham D F, Kerkhoven M V. Comparative study of nutrient-related processes in geographically separated wetlands: Towards a science base for functional assessment procedure[C]// Mitsch W J, ed. Global Wetlands: Old World and New. Columbus: Elsevier Press, 1994: 91-106.