

# 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

孙志高<sup>1,2</sup>, 刘景双<sup>2</sup>, 陈小兵<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003;

2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 运用地统计学方法对三江平原典型小叶章湿地土壤中硝态氮( $\text{NO}_3^- \text{—N}$ )和铵态氮( $\text{NH}_4^+ \text{—N}$ )的空间分布格局进行了研究。结果表明,湿地土壤不同土层  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  含量的变异性差异较大,但均表现为  $\text{NO}_3^- \text{—N} > \text{NH}_4^+ \text{—N}$ ,原因主要与其物理运移特性的差异有关。两种土壤在不同土层或相同土层中的  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  含量差异均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ );湿地土壤不同土层  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  的含量分布具有明显空间结构,符合不同变异函数理论模型,结构因素对空间异质性起主导作用,随机因素的影响相对较少。微地貌特征是导致其空间异质性的一个重要随机因素,水分条件和土壤类型则是两个重要结构因素;湿地土壤不同土层  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  含量的空间变异性均以向洼地中心倾斜方向最大。研究发现,水分条件是导致  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  含量在地势较低处形成低值区的主要原因,干湿交替则是导致  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  含量在地势较低处形成高值区的重要原因。

**关键词:** 分布格局; 硝态氮; 铵态氮; 小叶章湿地; 三江平原

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)03—0066—07

中图分类号: X144, S152

## Spatial Distribution Patterns of Nitrate Nitrogen and Ammonia Nitrogen in Typical *Calamagrostis Angustifolia* Wetland Soils of Sanjiang Plain

SUN Zhi-gao<sup>1,2</sup>, LIU Jing-shuang<sup>2</sup>, CHEN Xiao-bing<sup>1</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, CAS, Yantai, Shandong 264003, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract:** The spatial distribution patterns of nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^- \text{—N}$ ) and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+ \text{—N}$ ) in typical *Calamagrostis angustifolia* wetland soils of Sanjiang Plain were studied by Geostatistics method. Results showed that the variability of  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  and  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  contents in different soil layers had significant difference, with the order of  $\text{NO}_3^- \text{—N} > \text{NH}_4^+ \text{—N}$ , and the reasons were mainly correlated with the differences of their physical movement characteristics. Further analysis indicated that the differences of  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  and  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  contents in different soil layers or in same soil layer were much significant ( $P < 0.01$ ). The distribution of  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  and  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  contents in different soil layers had significant spatial structure, which accorded with different semivariogram models. The structure factors had significant effects on there spatial variability, while the effects of random factors were relatively less. Micro-physiognomy characteristic was an important random factor to induce spatial heterogeneity, while water condition and soil type were two important structure factors. The maximum spatial variability of  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  and  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  contents in different soil layers were observed in the direction leaning to the depression center. In addition, the studies also indicated that water condition was the main reason to induce the lower  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  content zones to be formed in the lower hypsography of depression, while the alternation of dry and wet was the import reason to induce the higher  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  content zones to be formed in the lower hypsography of depression.

**Keywords:** distribution pattern; nitrate nitrogen; ammonia nitrogen; *Calamagrostis angustifolia* wetland; Sanjiang Plain

收稿日期: 2008-09-18

修回日期: 2008-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(40803023); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-309)

作者简介: 孙志高(1979—), 男(汉族), 山东省烟台市人, 博士, 副研究员, 研究方向为湿地生物地球化学过程。E-mail: zgsun@yic.ac.cn.

土壤是植物的营养库之一,植物除向大气摄取所需的碳、氧等营养物质外,还必须从土壤中获得大部分营养物质来满足其生存需要。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<sup>[1]</sup>,其对于湿地系统诸生态过程有着重要影响。湿地土壤氮的时空分布特征,特别是无机氮含量的空间分布及时间变化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<sup>[2]</sup>,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<sup>[3-5]</sup>。湿地土壤是时空连续的变异体,土壤的特性参数、土壤水分运动的某些参数以及土壤中的有关状态变量等均具有高度的空间异质性<sup>[6]</sup>。经典统计方法在研究土壤特性参数变化时将研究对象在空间上的变化看作是随机的、互相独立的变化。但在一定范围内,不同地点的土壤参数存在一定的空间结构性,不能视为完全独立,亦即样点的间距超过一定距离时,各点的空间变化才可以认为是互相独立的<sup>[7]</sup>。地统计学是探讨自然环境要素空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一,它以区域化变量理论和变异函数为基础,适合研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性或空间相关性和依赖性的自然现象<sup>[8]</sup>。湿地土壤养分为一区域化变量,同时具有随机性和结构性特征<sup>[9]</sup>。硝态氮( $\text{NO}_3^- \text{—N}$ )和铵态氮( $\text{NH}_4^+ \text{—N}$ )含量是土壤的两个特征参数,它在不同空间位置上存在明显的空间变异性。国外关于土壤养分空间变异的研究自20世纪80年代特别是90年代以来取得了长足进展,而国内在该领域的研究较为薄弱,主要是90年代中期以后才开始进行这一领域的研究<sup>[10]</sup>。目前,国内学者已对土壤养分的空间变异进行了大量研究,但这些研究多集中于农田<sup>[11-13]</sup>、草地<sup>[14-16]</sup>和森林生态系统<sup>[17]</sup>等的相关探讨上,对湿地生态系统的相关研究还不多见。

三江平原是我国湿地面积较大、类型较齐全的地区之一。小叶章湿地是三江平原主要的湿地类型(34.45%)<sup>[18]</sup>。小叶章湿地常分布于高河漫滩、一级阶地和碟形洼地边缘,主要有典型草甸小叶章湿地(地表无积水)和沼泽化草甸小叶章湿地(地表季节积水)两种类型,分别发育着草甸沼泽土和腐殖质沼泽土<sup>[19]</sup>。两种小叶章湿地因处在同一样地的不同水分带上,对水分变化的指示极为敏感。目前,国内关于不同水分带上小叶章湿地土壤中 $\text{NO}_3^- \text{—N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{—N}$ 含量的空间分布格局研究还未见报道。本文对此进行了研究,目的在于揭示湿地土壤中 $\text{NO}_3^- \text{—N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{—N}$ 含量的空间分布特征、分布格局及其变异性,并探讨引起二者空间分布和空间变异

的主要结构因素和随机因素。研究结果不仅可为该区湿地氮循环研究提供基础数据,还为湿地土壤质量演变及湿地结构与功能等研究提供重要科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区选在黑龙江省东北部的三江平原腹地典型沼泽湿地分布区,区内海拔高度55.4~57.9 m,属温带大陆性季风气候,冬季严寒漫长,夏季温暖湿润,冰冻期达5个月,最大冻深达1.9 m。该区1月平均气温 $-18 \sim -21$ ,7月平均气温 $21 \sim 22$ ,年均气温 $1.6 \sim 1.9$ ,10月的年有效积温2300左右。该区年蒸发量为542.4~580 mm,年降水量为565~600 mm,年内降水分配不均,60%以上集中在6—9月。本研究的土壤样品于中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站以东12 km洪河三区野外试验场(47°35'16.6"N, 133°31'34.8"E)的典型小叶章湿地内采集。试验场的地貌类型为三江平原沼泽发育最为普遍的碟形洼地,坡降1:5000,面积约20 hm<sup>2</sup>。自洼地中心到边缘分布的主要植被有漂筏苔草(*Carex pseudocurica*)、毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)和小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)。土壤类型主要为草甸沼泽土、腐殖质沼泽土和泥炭沼泽土。

### 1.2 样品采集与分析

2005年5月,在洪河三区野外试验场按照“典型性、代表性”的原则设置小叶章湿地样区(根据两种小叶章湿地的分布范围,样区80%以上面积位于典型草甸小叶章湿地内(分区),不足20%面积位于沼泽化草甸小叶章湿地边缘的过渡带上(分区)),并沿碟形洼地东西方向随机建立49 m×49 m的取样小区。取样区内均匀设置7 m×7 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一层,共采集样品72个。将采集的土壤样品及时带回实验室自然风干后,用球磨机磨碎,过100目筛后装袋待测。土壤样品的分析项目包括 $\text{NH}_4^+ \text{—N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{—N}$ 。其中, $\text{NH}_4^+ \text{—N}$ 采用氯化钾浸提—靛酚蓝比色法测定, $\text{NO}_3^- \text{—N}$ 采用酚二磺酸比色法测定。

### 1.3 数据处理与分析

运用SPSS10.0和Origin7.5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。

湿地土壤养分为一区域化变量,同时具有随机性和结构性(空间自相关性)特征<sup>[9]</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,其半方差函数理论变异函数  $r(h)$  的计算式为<sup>[18]</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; $Z(x_i)$  与  $Z(x_i + h)$ ——分别为区域化变量  $Z(x)$  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。 $r(h)$  通常有 4 个重要参数,即块金值( $C_0$ )、基台值( $C_0 + C$ )、变程( $a$ )和分形维数( $D$ )<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 统计分析与正态分布检验

表 1 为湿地土壤不同土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量的描述性统计结果。从表 1 中可知,不同土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均含量均自表层向下依次降低,但其变异性则因氮素形态而异。总的来说,

两土层不同形态氮的变异性均表现为  $\text{NO}_3^- - \text{N} > \text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,原因可能主要与其物理运移特性的差异有关。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  带负电荷,易于被土壤胶体排斥,进而易于淋溶,而也正是由于  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  较为活跃的物理运移特性使得其在较深土层中也呈现出较高的变异性。与之相比, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  带正电荷,易于被土壤胶体吸附而不易淋失,而也正是由于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  较差的物理运移特性使得其在上层中的变异性明显高于下层。方差分析表明, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量在不同土层或相同土层中的差异均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

另外,由于半方差函数可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,所以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,使某些潜在的特征表现不明显,甚至会掩盖其固有的结构。为了检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  $= 0.05$ ,若  $P_{K-S} > 0.05$ ,则认为数据服从正态分布。由表 1 可知,湿地土壤不同土层的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量在 0.05 水平上均表现为正态分布,可以进行空间相关分析,并且 0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的  $P_{K-S}$  明显优于 10—20 cm 土层。

表 1 不同土层硝态氮和铵态氮含量的描述性统计

|       |                            |       |      |        |       |      |          |          | mg/kg     |
|-------|----------------------------|-------|------|--------|-------|------|----------|----------|-----------|
| 土层/cm | 项目                         | 均值    | 标准差  | 变异系数   | 最大值   | 最小值  | 偏度 $S_k$ | 峰度 $K_u$ | $P_{K-S}$ |
| 0—10  | $\text{NO}_3^- - \text{N}$ | 4.80  | 5.00 | 104.30 | 22.18 | 1E-3 | 1.692    | 3.493    | 0.256     |
|       | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 18.93 | 9.97 | 52.68  | 56.53 | 2.45 | 1.749    | 5.084    | 0.416     |
| 10—20 | $\text{NO}_3^- - \text{N}$ | 3.48  | 4.07 | 117.06 | 14.30 | 1E-3 | 1.198    | 0.457    | 0.124     |
|       | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 11.22 | 5.55 | 49.43  | 29.94 | 2.15 | 1.850    | 4.685    | 0.074     |

### 2.2 硝态氮和铵态氮含量的空间异质性

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。表 2 为不同土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量在各向同性下的变异函数理论模型及相关参数。

从表 2 中可知,不同土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量的基台值均远远大于块金值,表明在全方向上两种形态氮含量均具有明显空间结构。其中 0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的半方差函数与步长  $h$  的关系符合高斯模型, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  则符合球状模型。不同的是,10—20 cm 土层的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  分别符合球状模型和高斯模型。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。除 0—10 cm 土层

$\text{NO}_3^- - \text{N}$  的半方差函数与步长  $h$  关系的理论模型解释效率较低外,0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,10—20 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的半方差函数理论模型的解释效率均较高。

区域化变量的空间异质性  $S_{HZ}$  由两部分组成,即  $S_{HZ} = S_{HR}$  (随机误差引起) +  $S_{HA}$  (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  $S_{HA}$  对空间异质性  $S_{HZ}$  的贡献程度,而  $C_0 / (C_0 + C)$  则反映了随机部分  $S_{HR}$  引起的空间异质性占总空间异质性  $S_{HZ}$  的比例。

表2 各向同性下变异函数理论模型及参数

| 项 目                        | 土层/cm | 理论模型 | 块金值<br>$C_0$ | 基台值<br>$C_0 + C$ | $C / (C_0 + C)$ | 变程 $a$ | 决定系数<br>$R^2$ | 残差<br>RSS | 分维数<br>$D$ |
|----------------------------|-------|------|--------------|------------------|-----------------|--------|---------------|-----------|------------|
| $\text{NO}_3^- - \text{N}$ | 0—10  | 高斯模型 | 25.59        | 51.19            | 0.500           | 81.00  | 0.097         | 17.900    | 1.998      |
|                            | 10—20 | 球状模型 | 10.20        | 25.23            | 0.596           | 81.00  | 0.809         | 4.050     | 1.874      |
| $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 0—10  | 球状模型 | 47.10        | 177.20           | 0.734           | 81.00  | 0.979         | 28.000    | 1.792      |
|                            | 10—20 | 高斯模型 | 25.10        | 71.20            | 0.647           | 72.40  | 0.588         | 17.700    | 1.936      |

由表2可知,不同土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的空间变异程度存在明显差异,其中0—10,10—20 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 $C / (C_0 + C)$ 值均较高,说明结构因素对于其空间异质性的贡献率分别高达73.4%和64.7%,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的 $C / (C_0 + C)$ 值相对较低,说明结构因素对于其空间异质性的贡献率仅为50.0%和59.6%。比较而言,10—20 cm土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的 $C / (C_0 + C)$ 值要高于0—10 cm土层,说明结构因素对于上层土壤空间异质性的贡献率比下层土壤要低9.6%。与之相反,上层土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 $C / (C_0 + C)$ 值明显高于下层土壤,说明结构因素对于上层土壤空间异质性的贡献率比下层土壤要高8.7%。按照区域化变量空间相关程度的分级标准,当 $C_0 / (C_0 + C) < 25\%$ 时,变量具有强烈的空间相关性;当 $25\% < C_0 / (C_0 + C) < 75\%$ 时,变量具有中等程度的空间相关性;当 $C_0 / (C_0 + C) > 75\%$ 时,变量的空间相关性很弱。结合该分级标准以及表2可知,不同土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 $C_0 / (C_0 + C)$ 值 $[1 - C / (C_0 + C)]$ 介于26.6%~50.0%之间,均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、地形和土壤类型等)对于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的空间异质性起主导作用,而随机因素的影响相对较小。研究样地影响 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 空间异质性的随机因素主要与微地貌特征、不同土层微域水分条件及其引起的无机氮物理运移、有机氮矿化以及植物根系分布与吸收作用等有关。

变程 $a$ 可较好地反映区域化变量的空间影响范围。由表2可知,10—20 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变程(72.40 m)相对较低,说明其在相对较短距离内存在空间结构异质性。与之相比,0—10 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和0—10,10—20 cm土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变程均为81.00 m,说明其在相对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开始消失。

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。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(1.998), $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 最小(1.792),而10—20 cm土层则以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 $D$ 值较大(1.936), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 最小(1.874),说明0—10 cm土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的分布明显比10—20 cm土层复杂,而0—10 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的分布则较10—20 cm土层简单。

为了研究 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量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°,45°,90°和135°分别代表东—西,东北—西南,南—北,西北—东南方向。表3为不同土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量在各向异性下的变异函数理论模型及相关参数。从表3中可知,不同土层两种形态氮含量的基台值均远远大于块金值,表明在不同方向上二者均具有明显空间结构。其中0—10 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的半方差函数与步长 $h$ 的关系符合线性模型, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 符合高斯模型,而10—20 cm土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的半方差函数与步长 $h$ 的关系分别符合线性模型和高斯模型。

从 $R^2$ 和RSS对模型解释的效率可知,不同土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的半方差函数理论模型的解释效率均较高,其中前者在60%以上,后者则在70%以上。另外,通过分析表3中的 $C / (C_0 + C)$ 值可知,不同土层两种形态氮在各方向上的空间变异程度存在明显差异,其中0—10 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 $C / (C_0 + C)$ 值较高(0.799), $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 较低(0.636),10—20 cm土层则以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 较高(0.714), $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 较低(0.687)。比较而言,两种形态氮的 $C / (C_0 + C)$ 值在不同土层的变化与各向同性基本一致(表2,3)。而从区域化变量空间相关程度的分级来看,除0—10 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的空间相关性较强外,10—20 cm土层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 以及0—10,10—20 cm土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均具有中等程度的空间相关性。总之,在各向异性结构下,自然结构因素对于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量的空间异质性起主导作用(>60%),而这也与在各向同性结构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                         | 土层 cm | 理论模型 | 块金值<br>$C_0$ | 基台值<br>$C_0 + C$ | $C / C_0 + C$ | 变程 $a_1$ | 变程 $a_2$ | 决定系数<br>$R^2$ | 残差 RSS     |
|----------------------------|-------|------|--------------|------------------|---------------|----------|----------|---------------|------------|
| $\text{NO}_3^- - \text{N}$ | 0—10  | 高斯模型 | 26.09        | 71.67            | 0.636         | 273.80   | 82.40    | 0.614         | 368.380    |
|                            | 10—20 | 线性模型 | 9.90         | 34.64            | 0.714         | 84.23    | 84.23    | 0.639         | 171.240    |
| $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 0—10  | 线性模型 | 47.50        | 235.90           | 0.799         | 114.20   | 51.40    | 0.705         | 13 736.350 |
|                            | 10—20 | 高斯模型 | 24.44        | 78.09            | 0.687         | 72.37    | 65.62    | 0.750         | 1 026.530  |

### 2.3 硝态氮和铵态氮含量的空间分布格局

图 1 为不同土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量的空间分布特征。据图 1 可知,0—10,10—20 cm 土层的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量均表现出相似的分布特征,即沿着样地东—西方向(向洼地倾斜方向)一般形成较为明显的斑块高值区,边缘则一般形成斑块低值区。不同的是, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在向洼地倾斜方向一般形成较为明显的斑块低值区,而在边缘则一般形成斑块高值区。另外,从图 1 还可看出,0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量的等值线较其在 10—20 cm 土层稠密,说明  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在 0—10 cm 土层中的空间异质性要强于 10—20 cm 土层。与之相比,0—10 cm 土层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量的等值线较 10—20 cm 土层稀疏,说明

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在 0—10 cm 土层中的空间分布及其异质性较 10—20 cm 土层简单,而这一结果正好与前面半方差函数中参数  $D$  的变化趋势及分析结论相一致。为了进一步探讨不同土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的空间分布格局,本项研究将两种形态氮含量以 2 mg/kg 和 7 mg/kg 为界点划分为高、中和低 3 个等级(详见表 4)。

从表 4 可知,0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的中等含量区和高含量区所占比例(79.50%和 14.81%)要高于 10—20 cm 土层(56.25%和 0.21%),但低含量区所占比例(5.69%)则较 10—20 cm 土层低 37.85%。与之相比,0—10,10—20 cm 土层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的 3 个含量等级区所占的比例均比较接近。

表 4 硝态氮和铵态氮含量的空间分布格局

| 项目                         | 土层/cm | 2 mg/kg           |          | 2~7 mg/kg         |       | 7 mg/kg           |       |
|----------------------------|-------|-------------------|----------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|                            |       | 面积/m <sup>2</sup> | 百分比/%    | 面积/m <sup>2</sup> | 百分比/% | 面积/m <sup>2</sup> | 百分比/% |
| $\text{NO}_3^- - \text{N}$ | 0—10  | 69.73             | 5.69     | 973.87            | 79.50 | 181.40            | 14.81 |
|                            | 10—20 | 533.39            | 43.54    | 689.11            | 56.25 | 2.51              | 0.21  |
| $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 0—10  | 2.25E-02          | 1.63E-03 | 1.42              | 0.12  | 1 223.56          | 99.88 |
|                            | 10—20 | 0.00              | 0.00     | 1.13              | 0.09  | 1 223.87          | 99.91 |

## 3 结果分析

总的来说,导致不同土层  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  上述空间分布特征及其差异的原因可能主要取决于以下两方面因素。(1) 随机因素(如样地微地貌特征引起的微域水分条件和局域无机氮物理运移等)。如前所述,研究样地的东—西方向整体上是向洼地倾斜方向,因此,样地的微地貌特征使得不同土层的微域水分条件可能产生一定差异,进而影响着  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在土层中的物理运移。(2) 结构因素。前述研究可知,沿着样地东—西方向由于微地貌的存在而形成较为明显的水分交错带,而水分交错带的存在又使得沼泽湿地发育的土壤类型不尽一致。其中位于碟形洼地边缘地势相对较高的样区,地表无积水但常年保持湿润,发育着草甸沼泽土,而位于碟形洼地边缘向洼地倾斜的过渡带,其地势相对较低,地表在生长

季的一些时期常存在季节积水,这样的环境条件发育着腐殖质沼泽土。如前所述,研究样区面积的 80%以上(分区)位于碟形洼地边缘,而只有不到 20%的面积(分区)位于上述过渡带的边缘上。

位于过渡带边缘样区的土壤发育特点既不同于草甸沼泽土,也不同于腐殖质沼泽土,而是位于二者的过渡状态。相对于草甸沼泽土而言,其矿质土层的潜育化、潜育化过程更为明显,并且土壤的通气状况较差,质地更为黏重。表 5 为研究样地,分区各土层中不同形态氮含量的对比。

从表 5 中可知,区 0—10 cm 土层的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量均明显高于区,而 10—20 cm 土层的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量一般也相对于区有一定降低,原因主要与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  物理运移特性有关。区土壤相对较高的黏粒含量使得  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的物理运移即使在相对较好水分条件下也仅发生在 0—10 cm 土层而不易淋失到较深土壤中。

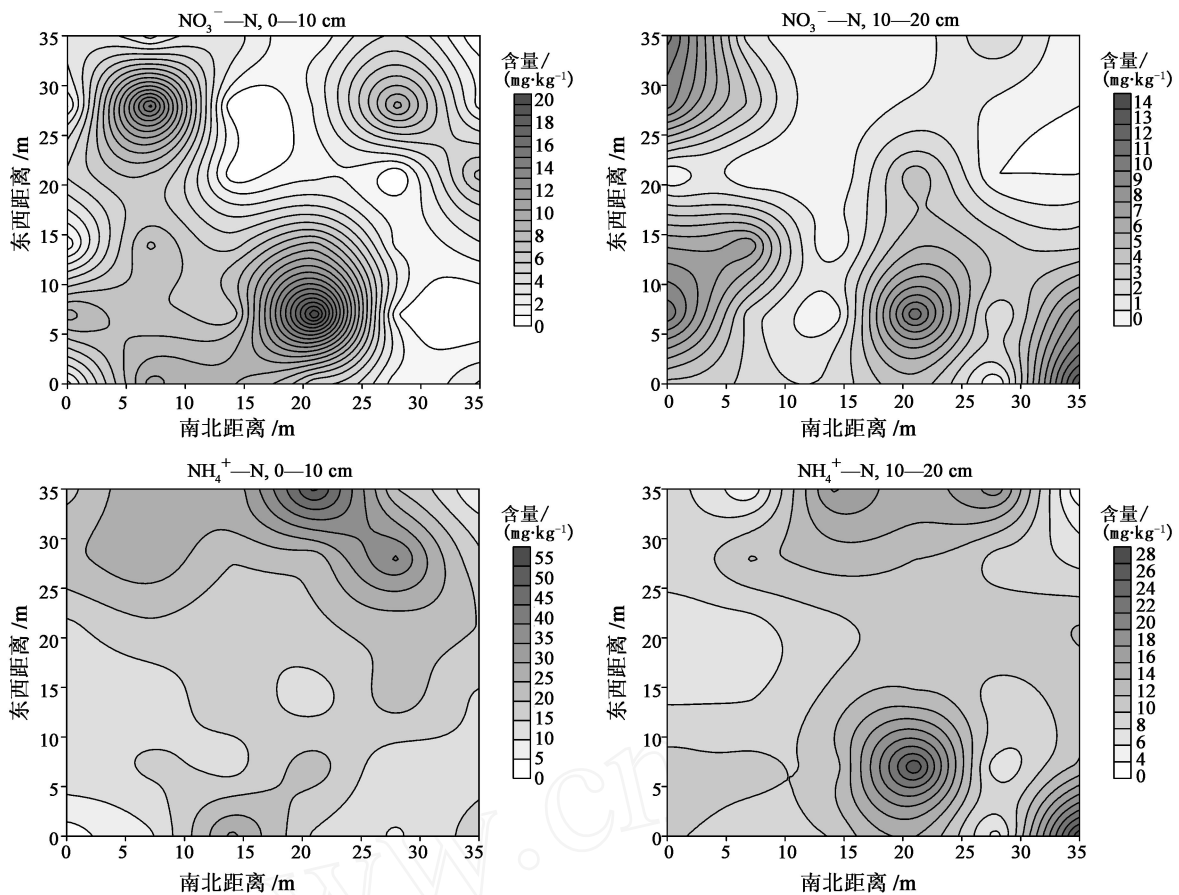


图1 不同土层硝态氮和铵态氮的空间分布特征

不同的是,  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  在区各土层中的含量均明显低于区的相应土层,这主要与  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  不易被土壤胶体吸附易于随水发生物理运移有关。区相对较好的水分条件使得  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  更易随水向洼地过渡带方向及更深层土迁移。因此,水分条件和土壤发育类型可能是导致各形态氮素空间异质性的两个重要结构性因素。

可见,导致  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  上述空间分布特征及其差异的原因主要与微地貌引起的微域水分条件和局域无机氮运移等随机因素以及,分区水分条件和土壤发育类型及其引起的较大范围无机氮物理运移特性差异等结构因素共同作用的结果有关。相对于  $\text{NO}_3^- \text{—N}$ ,  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  的物理运移特性相对较差,上述随机因素和结构性因素共同作用的结果使得其在整体上向东—西方向和较浅土层(0—10 cm, 10—20 cm)迁移,并易于在地势相对较低处发生累积,进而形成斑块高值区。比较而言,  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  更易于在水分条件较好的样区(地势相对较低)发生深层垂直淋失,进而形成斑块低值区。当然,研究样地  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  含量高值区和低值区的形成还与,分区的水分变化——干湿交替这一重要因素有关。干湿交替通过影

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,较短的干湿交替周期将有利于湿地脱氮,而长期淹水或较长干湿交替周期则不利于湿地脱氮。Verhoeven 等的研究也表明,湿地在干湿交替作用下的脱氮作用较长期淹水条件下强的多。研究样地的分区处于过渡带的边缘,其水分条件要优于分区,而这就使得其干湿交替周期一般较分区长的多。

依次类推,分区较长的干湿交替周期使得其脱氮作用较分区差的多,而这可能也是导致  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  在分区易于出现斑块高值区的重要原因之一。比较而言,不同土层  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  含量的空间分布斑块效应及分布格局存在明显差异,0—10 cm 土层  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  的空间分布斑块效应明显高于 10—20 cm 土层,而 10—20 cm 土层  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  的空间分布斑块效应则明显高于 0—10 cm 土层,主要表现为,分区中的高值区和低值区斑块数量增多且分布大都表现出较强的随机性,而这种较强的随机性可能主要与引起上述两土层  $\text{NO}_3^- \text{—N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{—N}$  空间异质性的随机因素有关。

表 5 两分区不同土层硝态氮和铵态氮含量对比

| 土层/cm | 分区 (n=24)                       |                                 | 分区 (n=12)                       |                                 |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|       | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N |
| 0—10  | 5.26 ±4.97                      | 15.56 ±5.84                     | 3.86 ±5.13                      | 25.66 ±13.08                    |
| 10—20 | 3.90 ±4.17                      | 11.40 ±5.86                     | 2.63 ±3.89                      | 10.87 ±5.10                     |

注: 表中数据为均值 ±S.D.

## 4 结论

(1) 湿地土壤不同土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均含量均自表层向下依次降低,但其水平变异性差异较大,均表现为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N > NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,原因主要与其物理运移特性的差异有关。二者在不同土层或相同土层中的含量差异均达到极显著水平 (P < 0.01)。

(2) 湿地土壤不同土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的含量分布具有明显空间结构,符合不同变异函数理论模型。二者在不同土层中的含量具有中等程度的空间相关性,但差异明显。结构因素对二者空间异质性起主导作用,而随机因素的影响相对较少。

(3) 湿地土壤不同土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的空间变异性均以向洼地中心倾斜方向最大,其中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在洼地倾斜方向一般形成明显斑块高值区,边缘一般形成斑块低值区,而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的空间分布特征正好相反。微地貌特征是导致二者空间异质性一个重要随机因素,水分条件和土壤类型则是两个重要结构因素。

(4) 水分条件是导致 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在地势相对较低处易于形成斑块低高值区的主要原因,干湿交替则是导致 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在地势相对较低处易于形成斑块高值区的重要原因。不同土层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的空间分布斑块效应及分布格局存在明显差异,高值区或低值区的斑块数量及分布可能主要与随机因素有关。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Mistch W J, Gosselin J G. Wetlands[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 2000:89-125.
- [2] Brinkley D, Hart S C. The component of nitrogen availability assessment in forest soil[J]. Advances in Soil Science, 1989, 10: 57-112.
- [3] Vitousek P M, White P S. Process studies in succession [C] // West D C, Shugart H H, Botkin B. Forest succession: concepts and application. New York: Springer-Verlag. 1981:267-276.
- [4] Tilman D. The resource-ratio hypothesis of plant succession[J]. American Naturalist, 1985, 125:827-852.
- [5] 李贵才, 韩兴国. 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):1187-1195.
- [6] 白军红, 余国营, 王国平. 地统计学在湿地土壤养分空间异质性研究中的应用[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5):311-314.
- [7] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1988:330-340.
- [8] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:105-121.
- [9] 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.
- [10] 黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展[J]. 土壤肥料, 2002(1):8-14.
- [11] 秦松, 樊燕, 刘洪斌, 等. 地形因子与土壤养分空间分布的相关性研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1):46-52.
- [12] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土有机碳空间异质性及其格局[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3):20-24.
- [13] 王淑英, 路苹, 王建立, 等. 北京市平谷区土壤有机质和全氮的空间变异分析[J]. 北京农学院学报, 2007, 22(4):21-25.
- [14] 龙训建, 钱鞠, 张春敏, 等. 高寒草甸区典型景观单元土壤养分空间变异性研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1):139-146.
- [15] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒群落土壤养分与地上生物量空间异质性[J]. 生态学报, 2008, 28(1):13-22.
- [16] 王海涛, 何兴东, 高玉葆, 等. 油蒿演替群落密度对土壤湿度和有机质空间异质性的响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(6):1145-1153.
- [17] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异[J]. 生态学报, 2007, 27(12):5168-5175.
- [18] 何琏. 中国三江平原[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 2000.
- [19] 张养贞. 三江平原沼泽土壤的发生、性质与分类[C]//黄锡畴. 中国沼泽研究. 北京:科学出版社, 1988:135-144.
- [20] 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.

(部分参考文献略)