

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

孙志高^{1,2}, 刘景双², 牟晓杰¹

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所, 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: 选择三江平原典型小叶章湿地不同水分带上的两种土壤类型 (草甸沼泽土和腐殖质沼泽土) 为研究对象, 对比研究了二者硝态氮和铵态氮含量的季节变化特征。结果表明, 二者不同土层硝态氮含量的季节变化特征差异较大, 缺乏相似性, 而铵态氮含量的季节变化特征尽管差异较大, 但存在一定相似性; 二者不同土层硝态氮和铵态氮含量季节变化特征的差异主要与不同生长期植物吸收作用、融雪补给、大气氮沉降、冻层深度、土壤结构和水分条件的差异有关; 不同土层硝态氮淋失、对铵态氮的吸附以及不同时期有机氮矿化和硝化-反硝化作用等进行的程度对其也有重要影响; 尽管硝态氮和铵态氮含量的季节变化特征在两种土壤不同土层间差别较大, 但均可用四次多项式进行模拟, 模拟效果比较理想, 基本反映了二者硝态氮和铵态氮含量的季节变化特征。图 2, 表 2, 参 14。

关键词: 硝态氮; 铵态氮; 土壤; 小叶章湿地; 三江平原

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1001-0068 (2010) 03-0277-06

Seasonal Change Characteristics of Nitrate Nitrogen and Ammonium Nitrogen in Typical *Calamagrostis angustifolia* Wetland Soils of Sanjiang Plain

SUN Zhi-gao^{1,2}, LIU Jing-shuang², MOU Xiao-jie¹

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

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: Two typical soils (meadow marsh soil and humus marsh soil), located in zones different in moisture regime in *Calamagrostis angustifolia* wetland of Sanjiang Plain, were selected as the study objects, and the seasonal change characteristics of nitrate nitrogen (NO_3^- -N) and ammonia nitrogen (NH_4^+ -N) contents in them were contrastively studied. Results showed that the seasonal change characteristics of NO_3^- -N contents in different layers of the two typical soils were significantly different, with lacked similarity. Comparatively, although the seasonal change characteristics of NH_4^+ -N contents in the two typical soils had differences, some similarities also could be found between them. In general, the differences of seasonal change characteristics of NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents in different layers of the two typical soils mainly correlated with plant absorption in different growth periods, thaw supplement, atmospheric nitrogen (N) deposition, frozen soil depth, soil structure and water conditions. In addition, the NO_3^- -N leaching, NH_4^+ -N adsorption, organic N mineralization and nitrification-denitrification in different soil layers also had significant effect on the seasonal change characteristics of NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents. Although the seasonal change characteristics of NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents in different layers of the two typical soils had significant differences, they all could be fitted by four-order polynomial, and these models gave a good fit, reflecting the seasonal change characteristics of NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents in the two typical soils.

Key words: nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; soil; *Calamagrostis angustifolia* wetland; Sanjiang Plain

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^[1], 其对

收稿日期: 2009-09-18; 修回日期: 2009-12-22.

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-223; KZCX2-YW-309); 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者”科研启动专项资金项目 (AJ0809BX-036); 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目 (2007KFJJ01)。

第一作者简介: 孙志高 (1979-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为湿地生物地球化学。

于湿地系统诸生态过程有着重要影响。硝态氮和铵态氮是两种可被植物直接吸收利用的有效态氮，其含量变化显著影响着湿地土壤氮的迁移与转化过程。湿地土壤硝态氮和铵态氮含量的季节变化特征不仅可反映出不同时期湿地土壤的养分供给状况及其可利用水平^[2]，而且还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^[3-5]。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，占湿地面积的 34.45%^[6]。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（地表存在少量季节积水）两种类型，分别发育着草甸沼泽土和腐殖质沼泽土^[7]。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，尽管国内学者已对不同生态系统土壤中硝态氮和铵态氮含量的季节变化特征进行了较多研究^[8-13]，但关于同一类型湿地不同水分带上不同湿地土壤硝态氮和铵态氮含量季节变化特征的对比研究还未见报到。对此进行研究，目的在于对比研究两种湿地土壤中硝态氮和铵态氮含量的动态变化特征，并对其季节动态进行模拟。研究结果不仅可为湿地氮素迁移转化研究奠定基础，而且还为该区湿地土壤质量演变和环境保护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 m ~ 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 1.9m。该区 1 月平均气温 -18℃ ~ -21℃，7 月平均气温 21℃ ~ 22℃，年均气温 1.6℃ ~ 1.9℃，≥10℃ 的年有效积温 2 300℃ 左右。该区年蒸发量为 542 mm ~ 580 mm，年降水量为 565 mm ~ 600 mm，年内降水分配不均，60% 以上集中在 6-9 月。土壤样品于中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站以 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，面积约 20 hm²。自洼地中心到边缘分布的主要植被有漂筏苔草（*Carex pseudocurauca*）、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 5-10 月，在洪河三区野外试验场的典型草甸小叶章湿地和沼泽化草甸小叶章湿地的样区内逐月采集土壤剖面样品。采样时，分别在两样区内采集 3 个典型土壤剖面，剖面深度为 80 cm，每 10 cm 一层，共分 8 层，然后对 3 个剖面样品进行等层次混合，共采集样品 96 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铵态氮（NH₄⁺-N）和硝态氮（NO₃⁻-N）。其中，NH₄⁺-N 采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定，NO₃⁻-N 采用酚二磺酸比色法测定。

1.3 数据处理与分析

运用 Origin7.5 软件对数据进行作图、计算和数学模拟。

2 结果与分析

2.1 硝态氮含量的季节变化特征及动态模拟

图 1 为湿地土壤硝态氮含量的季节变化特征。据图可知，草甸沼泽土表层土壤的硝态氮含量在 5 月最高（6.39 mg·kg⁻¹），之后一直降低并于 8 月取得最低值（0.59 mg·kg⁻¹），8 月以后，其含量又呈增加趋势。就其它土层而言，其硝态氮含量在 7 月之前的变化均不大，但之后却表现出明显的动态变化特征。其中 20 cm ~ 30 cm，50 cm ~ 60 cm 和 60 cm ~ 70 cm 土层中硝态氮含量的动态变化特征均呈倒“V”型，并均于 9 月取得最高值（1.95 mg·kg⁻¹、5.50 mg·kg⁻¹和 2.73 mg·kg⁻¹），而 30 cm ~ 40 cm、40 cm ~ 50 cm 和 70 cm ~ 80 cm 土层中硝态氮含量的动态变化特征均呈“N”型，并均于 8 月取得最高值（3.05 mg·kg⁻¹、10.67 mg·kg⁻¹和 6.38 mg·kg⁻¹）。与之相比，腐殖质沼泽土 0 ~ 10 cm 土层的硝态氮含量在 8 月前的变化较为平缓，之后则呈倒“V”型，并于 9 月取得最高值（9.49 mg·kg⁻¹）。30 cm ~ 40 cm，

60 cm ~ 70 cm 和 70 cm ~ 80 cm 土层的硝态氮含量除 8 月取得一次特别明显的峰值外 (22.54 mg·kg⁻¹、4.41 mg·kg⁻¹ 和 21.49 mg·kg⁻¹)，其它各月均变化不大。比较而言，10 cm ~ 20 cm、20 cm ~ 30 cm、40 cm ~ 50 cm 和 50 cm ~ 60 cm 土层的硝态氮含量在 5 - 7 月的变化均不大，但之后则表现出不同的变化特征。其中，10 cm ~ 20 cm、40 cm ~ 50 cm 土层的硝态氮含量均呈倒“N”型，并均于 8 月取得最大值 (6.84 mg·kg⁻¹ 和 8.68 mg·kg⁻¹)。而 20 cm ~ 30 cm、50 cm ~ 60 cm 土层的硝态氮含量均呈倒“V”型，并均于 9 月取得最大值 (11.49 mg·kg⁻¹ 和 4.04 mg·kg⁻¹)。由于硝态氮是可被植物吸收利用的矿质氮，不被土壤吸附而易造成淋失，所以湿地土壤中硝态氮含量的季节变化特征除与植物吸收作用有关外，其受融雪补给、大气氮沉降、水分条件、冻层深度以及土壤结构等因素的影响更为明显。总的来说，导致两种土壤表层硝态氮含量动态变化特征的差异可能主要与大气氮沉降、植物吸收以及硝态氮的垂直淋失等因素有关。由于 5 月份两种小叶章均处于萌芽时期，因此其对于氮的需求量均较大。又因此间的氮沉降量较高 (3.105 kg·hm⁻²，占全年输入量的 41.03%)^[14]，再加上冬季积雪的融化输入使得两种土壤表层的硝态氮含量均较高。由于草甸沼泽土地表的水分条件较差且较深土层处于封冻状态，一般不利于硝态氮的垂直淋失，因而使得其表层在 5 月份具有较高的硝态氮含量。之后，随着冻层的融通以及雨季和植物生长高峰的来临，表层土壤的硝态氮除部分被植物吸收外，还有相当一部分被淋失至深层土壤中，由此导致其含量逐渐下降。8 月以后，随着降水的相对减少以及植物成熟期的到来，植物吸收氮量以及垂直淋失氮量均明显降低，由此导致其含量又呈增加趋势。与之相比，腐殖质沼泽土地表的水分条件在 8 月之前一直较好，易于硝态氮的垂直淋失，而这就导致了其表层土壤在 5 月份虽具有较高的硝态氮输入量但其含量并不高。之后，随着降水的增多以及植物吸收作用的增强，其含量一直不高且变化不大。8 月以后，表层土壤硝态氮含量的变化可能也与降水减少导致的水分条件相对较差，以及植物成熟对硝态氮的吸收作用减弱有关。与表层土壤相比，二者表层以下各土层硝态氮含量的动态变化总体上在 7 月前一直较低且变化不大，而 8 - 10 月则较高。7 月较低的硝态氮含量一方面与此间植物处于生长旺期对氮的需求量较大有关 (对深层土壤影响不大)；另一方面也与此间较多降水引起的上层土壤硝态氮向深层大量淋失有关。8 - 10 月较高的硝态氮含量一方面与植物处于成熟期而对氮的需求量降低有关 (对深层土壤影响不大)；另一方面则与不同土层物理结构对硝态氮淋失的影响有关。当然，导致两种土壤不同土层硝态氮含量及其变化特征的差异还与其在不同时期不同温度、水分等因素影响下的有机氮矿化、硝化 - 反硝化作用等过程进行的程度有关。

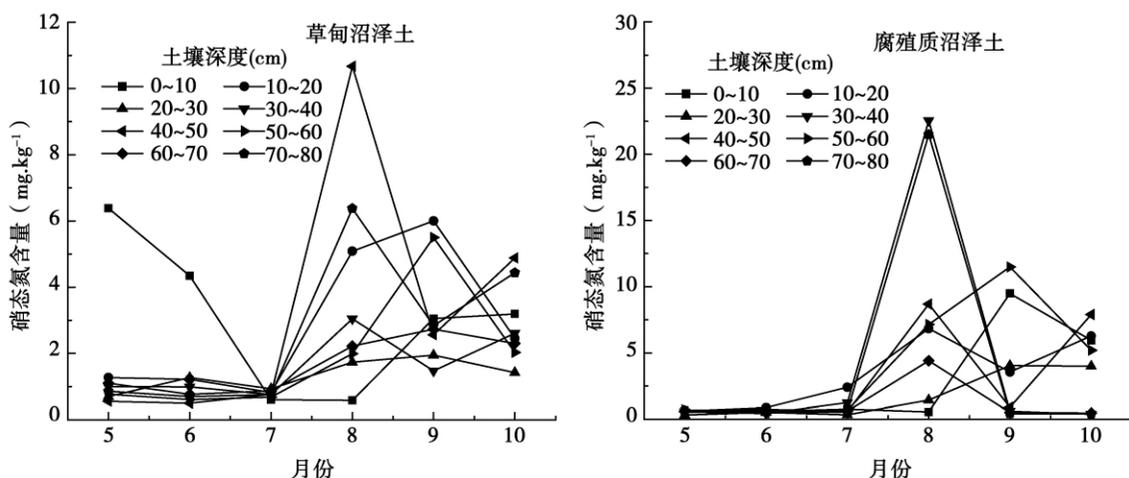


图1 湿地土壤中硝态氮含量的季节变化

为了研究两种土壤中硝态氮含量季节变化的普遍规律，根据不同土层硝态氮含量实测值的季节变化特征，采用四次多项式 ($y = A + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3 + B_4x^4$) 分别对二者不同土层的硝态氮含量进行季节动态模拟 (表1)。由表1可知，草甸沼泽土硝态氮含量季节变化的动态模拟除 30 cm ~ 40 m, 40 cm ~ 50 cm

和 70 cm ~ 80 cm 土层相对较差外 ($0.56 < R^2 < 0.66$), 其它土层的模拟效果均比较理想 ($R^2 > 0.90$)。腐殖质沼泽土除 30 cm ~ 40 m, 40 cm ~ 50 cm, 60 cm ~ 70 cm 和 70 cm ~ 80 cm 土层的模拟效果相对较差外 ($0.52 < R^2 < 0.63$), 其它土层的模拟效果也均比较理想 ($R^2 > 0.85$)。因此, 一元四次方程可以比较理想的描述两种湿地土壤多数土层硝态氮含量的季节动态。

表 1 湿地土壤硝态氮含量的季节动态模拟

土壤类型	土层 cm	拟合方程参数					拟合优度 (R^2)
		A	B_1	B_2	B_3	B_4	
草甸沼泽土	0 ~ 10	-529.234 3	317.911 2	-68.518 9	6.339 6	-0.213 4	0.998 5
	10 ~ 20	-211.741 9	139.033 0	-33.194 5	3.421 4	-0.127 8	0.935 4
	20 ~ 30	-115.181 5	66.988 5	-14.276 6	1.331 6	-0.045 7	0.896 0
	30 ~ 40	238.170 3	-133.275 8	27.367 4	-2.438 6	0.079 9	0.575 8
	40 ~ 50	1 200.663 1	-674.132 0	138.144 3	-12.253 6	0.398 4	0.566 1
	50 ~ 60	-478.679 0	287.385 5	-63.274 6	6.055 2	-0.212 1	0.997 0
	60 ~ 70	-6.861 1	10.579 0	-3.585 0	0.453 5	-0.019 2	0.973 5
	70 ~ 80	580.148 4	-322.937 3	65.635 6	-5.774 7	0.186 5	0.655 5
腐殖质沼泽土	0 ~ 10	-1 090.785 0	639.571 9	-137.465 5	12.832 1	-0.438 4	0.908 1
	10 ~ 20	721.484 0	-409.966 4	85.111 7	-7.651 9	0.252 5	0.849 8
	20 ~ 30	-293.942 8	173.484 0	-37.514 8	3.520 9	-0.120 6	0.997 9
	30 ~ 40	2 855.741 8	-1 605.015 4	328.958 1	-29.149 8	0.944 9	0.553 7
	40 ~ 50	1 319.365 6	-752.538 2	157.195 0	-14.264 3	0.475 8	0.624 0
	50 ~ 60	-607.359 1	378.476 7	-86.561 7	8.592 2	-0.310 8	0.991 0
	60 ~ 70	513.492 6	-287.893 0	58.929 8	-5.216 8	0.169 0	0.543 2
	70 ~ 80	2 635.839 7	-1 480.420 3	303.214 6	-26.849 4	0.869 6	0.520 8

2.2 铵态氮含量的季节变化特征及动态模拟

图 2 为湿地土壤铵态氮含量的季节变化特征。据图可知, 草甸沼泽土表层土壤的铵态氮含量在 5 月最高 ($18.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 之后一直降低并于 8 月取得最低值 ($5.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 8 月以后, 其含量变化整体呈倒“V”型。10 cm ~ 20 cm 土层在 5-9 月的整体变化呈“V”型, 之后开始下降, 并分别在 7 月和 9 月取得最小值和最大值 ($4.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $17.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。20 cm ~ 30 cm 土层在 5-10 月的整体变化也呈“V”型, 并于 7 月取得最低值 ($1.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 而其它时期的变化则相对平缓。30 cm ~ 40 cm 土层在 6 月前的铵态氮含量较低且变化平缓, 之后整体呈“M”型, 即分别于 7 月和 9 月取得两次较高值 ($6.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。40 cm ~ 50 cm 土层在 5-10 月的整体变化呈“W”型, 即于 8 月取得最高值 ($21.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 而分别在 6 月和 9 月取得最低值和一次相对低值 ($0.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。50 cm ~ 60 cm、60 cm ~ 70 cm 土层在 8-10 月的变化均呈倒“V”型, 而在 5-8 月的变化则不同, 表现为前者缓慢增加, 后者则先降低后增加, 并于 6 月取得最低值 ($3.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。70 cm ~ 80 cm 土层在 5-10 月的变化整体呈斜“W”型, 并分别于 7 月和 10 月取得最低值和最高值 ($3.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $13.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。与之相比, 腐殖质沼泽土 0 ~ 10 cm 土层铵态氮含量的季节变化呈“V”型, 并于 7 月取得最低值 ($17.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。10 cm ~ 20 cm、70 cm ~ 80 cm 土层的变化特征较为相似, 8 月前均呈“V”型, 之后迅速降低。20 cm ~ 30 cm 土层除 5 月和 9 月的含量相对较高外 ($12.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $7.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 其它时期较为接近。30 cm ~ 40 cm 土层除 8 月取得一次特别高的峰值外 ($27.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其它时期也变化不大。而 40 cm ~ 50 cm 土层除 8 月和 10 月取得相对较高值外 ($12.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其它时期的变化则较为平缓。50 cm ~ 60 cm 土层在 7 月前变化不大, 之后则呈倒“V”型, 并于 9 月取得最高值 ($22.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。而 60 cm ~ 70 cm 土层的整体变化呈“M”型, 并分别于 5 月和 9 月取得最小值和最大值 ($2.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $20.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。总的来说, 尽管草甸沼泽土和腐殖质沼

泽土各土层铵态氮含量的季节变化特征不尽一致,但多数土层整体上均表现出5月相对较高,7月降低,8-9月相对较高,而10月又降低的趋势。5月土壤中相对较高的铵态氮含量一方面与此间氮沉降量大以及积雪融化氮输入有关,另一方面则与4月以后气温逐渐回升,土层逐渐解冻,微生物活动逐渐加强,有机氮矿化速率增加,进而使得上一年累积的氮素得以释放有关。7月土壤中铵态氮含量的降低主要与此间植物处于生长旺期,需从土壤中吸收大量的有效态氮以满足其生长需要有关。尽管此间的气温较高,有利于土壤有机氮的矿化,但由于植物生长对氮的需求量很大,由此导致土壤中其含量的降低。8-9月特别是8月土壤中相对较高的铵态氮含量主要与此间气温较高、有机氮矿化程度较强,再加上植物生长处于成熟期而对氮的需求量降低有关。至10月,由于气温较低,有机氮的矿化强度减弱,由此导致铵态氮含量在此间又开始降低。由于铵态氮也为植物可直接吸收利用的有效态氮,可被土壤吸附而不易造成淋失,因而其不同土层季节变化特征的差异可能受植物根系吸收累积能力、有机氮矿化作用、硝化-反硝化作用以及土壤吸附等因素的综合影响更为明显。比较而言,两种湿地土壤不同土层铵态氮含量的季节变化特征尽管具有一定的共性,但仍存在较大差异,其原因除了与上述因素有关外,还与二者所处湿地水文状况、土壤结构及其对铵态氮吸附程度的差异有关。

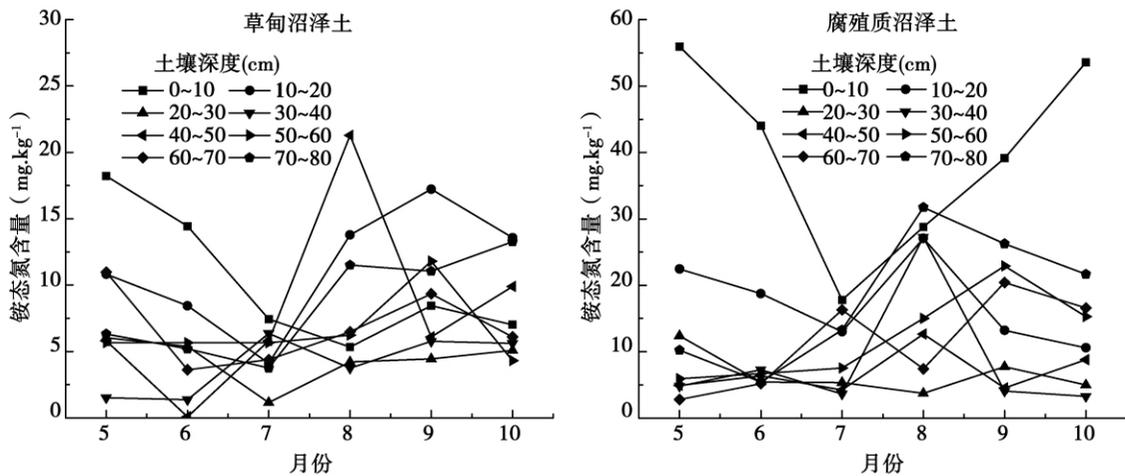


图2 湿地土壤中铵态氮含量的季节变化

为了研究两种土壤中铵态氮含量季节变化的普遍规律,根据不同土层铵态氮含量实测值的季节变化特征,也采用四次多项式分别对二者不同土层的铵态氮含量进行季节动态模拟(表2)。由表2可知,草甸沼泽土铵态氮含量季节变化的动态模拟除20 cm~30 cm、30 cm~40 cm和40 cm~50 cm土层相对较差外($0.68 < R^2 < 0.75$),其它土层的模拟效果均比较理想($R^2 > 0.84$)。与之相比,腐殖质沼泽土30 cm~40 cm、40 cm~50 cm土层的模拟效果最差($0.29 < R^2 < 0.45$),10 cm~20 cm、60 cm~70 cm土层较好($0.52 < R^2 < 0.66$),而其它土层的模拟效果均比较理想($R^2 > 0.90$)。因此,一元四次方程也可比较理想地描述两种湿地土壤多数土层铵态氮含量的季节动态。

3 结论

草甸沼泽土和腐殖质沼泽土不同土层硝态氮含量的季节变化特征差异较大,缺乏一定相似性。与之相比,二者不同土层铵态氮含量的季节变化特征尽管差异较大,但具有一定相似性,即多数土层铵态氮含量在5月相对较高,7月降低,8-9月相对较高,10月降低。

草甸沼泽土和腐殖质沼泽土不同土层硝态氮和铵态氮含量季节变化特征的差异主要与不同生长期植物吸收作用、融雪补给、大气氮沉降、土壤冻层深度、土壤结构和土壤水分条件的差异有关。另外,不同土层硝态氮淋失、对铵态氮的吸附以及不同时期温度、水分等因素影响下的有机氮矿化、硝化-反硝化作用等过程进行的程度对其也有重要影响。

表 2 湿地土壤铵态氮含量的季节动态模拟

土壤类型	土层 cm	拟合方程参数					拟合优度 (R^2)
		A	B_1	B_2	B_3	B_4	
草甸沼泽土	0~10	-939.528 9	564.484 8	-120.764 4	11.092 7	-0.371 5	0.999 8
	10~20	-645.974 3	419.838 6	-97.515 6	9.718 8	-0.350 6	0.884 5
	20~30	-375.950 2	228.784 0	-49.801 9	4.658 7	-0.158 5	0.680 1
	30~40	328.988 7	-191.110 6	40.513 7	-3.695 8	0.123 2	0.684 5
	40~50	3 244.663 8	-1 813.695 1	370.937 1	-32.900 9	1.070 9	0.743 2
	50~60	-908.546 8	541.642 6	-117.918 9	11.173 3	-0.388 5	0.921 3
	60~70	288.613 0	-114.968 1	14.996 3	-0.611 6	-0.002 1	0.984 5
	70~80	225.314 4	-104.528 9	17.384 0	-1.186 6	0.028 1	0.841 5
腐殖质沼泽土	0~10	-2 330.157 7	1 436.791 1	-312.633 4	29.017 2	-0.973 9	0.935 9
	10~20	1 285.649 2	-684.195 7	135.092 5	-11.559 6	0.361 7	0.523 4
	20~30	-14.469 4	49.002 6	-16.895 2	2.046 2	-0.082 7	0.899 0
	30~40	2 283.212 3	-1 280.013 3	261.966 0	-23.146 2	0.746 9	0.430 0
	40~50	861.825 8	-490.330 1	102.602 3	-9.308 3	0.309 8	0.298 9
	50~60	-977.105 7	598.528 1	-134.129 2	13.078 3	-0.465 8	0.999 9
	60~70	-604.228 9	335.042 7	-68.588 3	6.204 8	-0.207 5	0.652 4
	70~80	2 072.815 9	-113.6863	217.5608	-18.2541	0.5583	0.9344

尽管硝态氮和铵态氮含量的季节变化特征在两种土壤不同土层间差别较大,但均可用四次多项式 ($y = A + B_1x + B_2x_2 + B_3x_3 + B_4x_4$) 进行动态模拟,并可得到比较理想的模拟效果。

参考文献:

- [1] Mistch W J, J G. Gosselin Wetlands [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. 2000.
- [2] Brinkley D, S C Hart. The component of nitrogen availability assessment in forest soil [J]. Advances in Soil Science, 1989, 10: 57-112.
- [3] Vitousek P M, P S White. Process studies in succession [A]. In: West D C, Shugart H H, Botkin B D (eds). Forest succession: concepts and application [C]. 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] 何 珺. 中国三江平原 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2000.
- [7] 张养贞. 三江平原沼泽土壤的发生、性质与分类 [M] // 黄锡畴中国沼泽研究. 北京: 科学出版社, 1988.
- [8] 孟 盈, 薛敬意, 沙丽清, 等. 西双版纳不同热带森林下土壤铵态氮和硝态氮动态研究 [J]. 植物生态学报, 2001, 25 (1): 99-104.
- [9] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究 [J]. 植物生态学报, 1997, 21 (4): 335-341.
- [10] 李雪梅, 张利红. 硝态氮在羊草-土壤中的分配及其季节动态 [J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 1999, 26 (4): 388-392.
- [11] 石 英, 沈其荣, 茆泽圣, 等. 旱作水稻根际土壤铵态氮和硝态氮的时空变异 [J]. 中国农业科学, 2002, 35 (5): 520-524.
- [12] 白军红, 邓 伟, 欧阳华, 等. 向海芦苇沼泽湿地土壤硝态氮含量的季节动态变化 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2005, 21 (2): 85-87.
- [13] 白军红, 崔保山, 李晓文, 等. 向海芦苇沼泽湿地土壤铵态氮含量的季节动态变化 [J]. 草业学报, 2006, 15 (1): 117-119.
- [14] 孙志高, 刘景双, 王金达. 三江平原典型湿地系统大气湿沉降氮素动态及其生态效应 [J]. 水科学进展, 2007, 18 (2): 182-192.