

沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应

周旺明^{1,2}, 秦胜金³, 刘景双², 代力民¹

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 3.沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866)

摘要:通过室内控制培养试验方法,研究了不同温度和冻融循环过程对沼泽湿地土壤有机氮矿化影响。结果表明,湿地土壤中无机氮以铵态氮为主,温度和培养时间显著影响土壤有机氮的矿化,在温度-25~30℃之间,N的矿化速率、硝化速率随温度增加而增加,30℃时矿化速率($1.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)和硝化速率($0.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)最大。沼泽湿地土壤有机氮矿化培养时间以4~5周较为适宜。冻结温度和冻融次数显著影响土壤有机氮矿化过程,且-25~5℃冻融循环比-5~5℃冻融循环矿化累积量高。冻融循环促进了土壤有机氮的矿化,有利于土壤中有效氮的累积,为春季植物生长提供足够的氮素,对维持生态系统稳定有重要意义。

关键词:温度;冻融过程;氮矿化;沼泽湿地;三江平原

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)04-0806-06

Effects of Temperature and Freeze-thaw on Soil Nitrogen Mineralization in Typical *Calamagrostis Angustifolia* Wetlands in Sanjiang Plain

ZHOU Wang-ming^{1,2}, QIN Sheng-jin³, LIU Jing-shuang¹, DAI Li-min

(1.Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 3.Forestry College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: As a mainly limiting factor for plant growth and net primary productivity, the availability of soil nitrogen is critical for the carbon budgets of terrestrial ecosystem. The climate warming in the Sanjiang Plain is obviously in recent years. In order to get a better understanding of the effect of temperature on the soil nitrogen mineralization to predict soil nitrogen cycling. The effects of temperature and freeze-thaw on soil nitrogen mineralization in typical *Calamagrostis angustifolia* wetland were evaluated by laboratory incubation method. Based on the analysis of inorganic nitrogen in soil extracts before and after incubation, the results showed that the $\text{NH}_4\text{-N}$ was the main characteristic in the soil inorganic nitrogen. The net mineralization of soil nitrogen was affected by temperature and incubation time. The net mineralization rate and nitrification rate increased with temperature from -25℃ to 30℃. The mineralization rate ($1.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) and nitrification rate ($0.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) had the highest value at 30℃ which could be the suitable temperature for nitrogen mineralization, and the appropriate incubation time was 4 weeks to 5 weeks. The marsh soil nitrogen mineralization was significantly affected by freeze temperature and numbers of freeze-thaw cycling. The lower freeze temperature generally promoted the nitrogen mineralization in the soils. The results implied that freezing-thawing of the wetland ecosystem accelerated the soil nitrogen mineralization, and increased the soil available nitrogen to favor the growth of plants and also increased the possibility of runoff loss of soil nutrients.

Keywords: temperature; freeze-thaw; nitrogen mineralization; marsh wetlands; Sanjiang Plain

氮素是植物和微生物生长的必需元素,而湿地土壤的无机氮含量通常维持在较低的水平上,常常是最

主要的限制性养分^[1-2]。土壤氮库中的氮主要以有机氮的形式存在,土壤中的有机氮必须不断地通过土壤微生物的矿化作用,将有机氮转化为植物可吸收的有效氮形式,因此土壤有机氮的矿化是生态系统中氮素转移的重要途径之一^[3]。

土壤有机氮的矿化主要受土壤微生物控制,而微生物的活动受土壤环境和生物因子的影响^[3],主要环

收稿日期:2010-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(30900208);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-309)

作者简介:周旺明(1979—),男,安徽安庆人,博士后,主要从事生物地球化学研究。E-mail:zhouwangming@126.com

境因子包括温度、湿度以及土壤的通透性(通过土壤的孔隙影响微生物的呼吸和分布)^[2],其中温度是影响土壤净矿化的重要因素^[4]。近些年来,利用实验室控制温度来研究土壤氮素的矿化过程,已成为国际上普遍采用的方法。该方法可以较准确地测定出在控制条件(如温度等)下有机氮矿化的速率,从而研究温度对土壤微生物活性的影响,估算有机氮矿化的速率,并为生态系统过程的模型提供参数^[5-8]。近年来国外有关这方面的报道很多^[6-9],国内已有周才平等^[3]和王常慧等^[8]进行了温度对森林生态系统和草原生态系统土壤氮矿化的研究,但有关温度对沼泽湿地土壤有机氮的矿化研究较少^[9]。

三江平原是我国湿地面积最大、类型最全的沼泽地区之一,属于温带大陆性气候,土壤在秋末春初存在多次冻融过程。因此,通过室内培养控制方法,研究了沼泽湿地土壤在不同温度和冻融循环条件下土壤有机氮的矿化过程,以期为湿地生态系统的模型提供参数。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江平原位于黑龙江省东北部,是由黑龙江、松花江和乌苏里江冲积而成的低平原,研究区选在三江平原有代表性的别拉洪河与浓江河河间地带(E133°31',N47°35'),区内分布有大面积的天然沼泽湿地。当地海拔高度55.4~57.9 m,属北温带湿润大陆性季风气候,1月平均气温-18~-21℃,7月平均气温21~22℃,年均温1.6~1.9℃,冰冻期达5个月。年降水量565~600 mm,60%以上集中在6—8月,年蒸发量542.4~580 mm^[9]。试验地点位于中科院三江平原沼泽湿地生态实验站的野外试验场。试验场内的地貌类型为三江平原沼泽发育最为普遍的碟形洼地,主要植被代表种有小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)、漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)和乌拉苔草(*Carex meyeriana*)等。土壤类型主要为草甸沼泽土、腐殖质沼泽土和潜育白浆土。

1.2 研究方法

1.2.1 采样及试验室培养

在三江平原沼泽湿地生态站小叶章草甸样地,采集0~15 cm表层土壤,新鲜土样过4 mm筛,剔除草根及其他杂物后混匀,在25℃恒温培养箱中培养1周,减小过筛对土壤的影响。由于水分也是影响土壤氮素矿化的一个重要因素^[10],而本研究主要是为了研

究温度变化对湿地土壤氮素矿化的影响,必须将土壤含水量调节至不影响土壤氮素矿化的范围。已有研究表明,土壤氮矿化最大的矿化速率是发生在土壤水分含量是0.3 MPa与0.1 MPa,相当于10%~35%重量的含水量^[11]。因此,培养土壤的含水量控制在35%左右。称取培养后的土壤样品[含水量为(35.25±0.16)%]100 g置于三角瓶中,为防止水分蒸发,瓶口用保鲜膜密封并在膜上扎2个小孔,3 d或4 d称重1次,补加失去的水分。

本研究设两种不同温度处理。(1)研究不同温度处理下湿地土壤氮矿化过程:将一部分三角瓶置于30、20、5、-5℃和-25℃培养箱中培养,分别在1、2、4、6周后取样,每个处理共取3个重复。(2)研究在不同冻结温度的冻融循环下湿地土壤氮矿化过程:将土壤分别在-5℃和-25℃完全冻结,然后在5℃融化1 d,这为一个冻融周期。在冻融1、2、4、6次和10次后取样,采样时每个处理取3个样品。此外,分别将3份土壤在-5℃和-25℃下培养2周,然后在5℃下培养2周后取样。

所有土壤样品均分析其铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量,计算在一定时间内累积的矿化氮的量。矿化率的计算方法:土壤净矿化速率=(培养后的无机N量-培养前的无机N量)/培养天数。

1.2.2 化学分析

取一部分土壤样品在105℃条件下、24 h烘干法做含水量分析;另取7 g土壤样品用30 mL 2 mol·L⁻¹的KCl溶液浸提,在摇床上充分振荡30 min后用定量滤纸过滤,在SKALAP连续流动分析仪测定滤液NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量^[12]。

1.3 数据处理

工具软件主要是Excel 2003、Origin 7.5和SPSS 11.5。利用SPSS 11.5对数据进行统计分析,应用单变量双因素方差分析(Univariate analyses)确定培养时间和温度以及冻结温度和冻融次数对土壤氮矿化的影响。

2 结果与分析

2.1 湿地土壤氮矿化对温度变化的响应

图1表示的是小叶章湿地土壤在不同温度条件下培养,土壤无机氮累积的变化。可以看出,培养温度和时间都对氮素的矿化积累有很大影响,方差分析表明(表1),差异均达到显著水平($P<0.05$)。在-25~20℃之间,土壤氮素矿化量相对较小,且对温度的变

化反应较弱,而在 30 ℃时,氮素的矿化量明显上升。这说明小叶章湿地土壤矿化的最佳温度为 30 ℃左右,该条件下氮矿化速率为 1.17 mg·kg⁻¹·d⁻¹。

培养温度显著影响净氮矿化和硝化速率 ($P<0.05$),但对土壤中铵态氮影响较小($P=0.249$)。当温度从-25 ℃升高到 30 ℃时,净矿化速率和硝化速率分别增加 2.8 倍和 65.8 倍,而土壤中铵态氮增加量变化不大。从图 1 可以看出,-25~20 ℃培养温度下,土壤氮的矿化量主要受铵氮影响,而硝态氮变化较小。这与前人对森林和湿地研究结果相似^[6-3,9],而与草地研究结果有所差异^[8,14]。其原因主要与土壤有机质含量、微生物种类以及湿地土壤含水量显著高于草地有关^[8-9]。

研究结果还表明,在 28 d 以前,培养温度为-25~20 ℃时土壤中矿化氮随着培养时间的延长逐渐增加;但在培养时间为 42 d 时,土壤中的矿化氮反而有所降低,其原因可能有:(1)培养时间太长,土壤中氮素矿化量积累,抑制土壤有机氮的进一步矿化,使得土壤矿化量增加缓慢或降低^[15];(2)由于反硝化产生气态氮损失;(3)试验误差造成的^[1]。培养温度为 30 ℃时,在培养的第 42 d 取得最大氮矿化量 (53.80 mg·kg⁻¹)。这一方面再次说明高温有利于湿地土壤氮素的矿化^[6];另一方面在 7 月高温季节土壤温度完全可能达到 30 ℃,在这个季节,土壤氮矿化很容易发生,为

植物生长提供必要的无机氮。

2.2 湿地土壤氮矿化对冻融的响应

图 2 是不同冻融循环过程下,湿地土壤矿化氮的累积变化。可以看出,-25~5 ℃冻融循环条件下,土壤中的矿化氮随着冻融次数的增加呈增加趋势。-5~5 ℃冻融循环条件下,前 2 次冻融过程中土壤中矿化氮呈下降趋势,而经 4 次冻融后,土壤中矿化氮随着冻融次数的增加呈增加趋势。Gasser 的研究结果表明,一次冻融过程不一定会提高土壤中矿质氮,但 2 d 内的多次冻融对 N 的矿化有轻微提高^[16]。Herrmann 等研究结果也表明,多次冻融提高了土壤中有机氮的矿化^[17]。-25~5 ℃冻融循环处理比-5~5 ℃冻融循环处理下土壤中的矿化氮累积量高,这与 DeLuca 等研究结果一致^[16]。方差分析表明(表 2),不同的冻融处理与冻融次数对湿地土壤中矿化氮的累积有显著影响($P<0.05$)。

图 3 是在-5 ℃和-25 ℃培养 2 周后,在 5 ℃下再培养 2 周后土壤中矿化氮的累积变化。可以看出,-25~5 ℃冻融处理与-5~5 ℃冻融处理后,土壤中矿化氮的累积量分别提高到 (38.92±2.98)mg·kg⁻¹ 和 (31.99±1.07)mg·kg⁻¹, 高于在 5 ℃下培养的土壤矿化氮累积量 (26.2±4.97)mg·kg⁻¹, 其矿化速率分别为 1.36、1.14 mg·kg⁻¹·d⁻¹ 和 0.76 mg·kg⁻¹·d⁻¹。-25~5 ℃冻融处理后的土壤矿化氮显著高于 5 ℃下培养的土壤

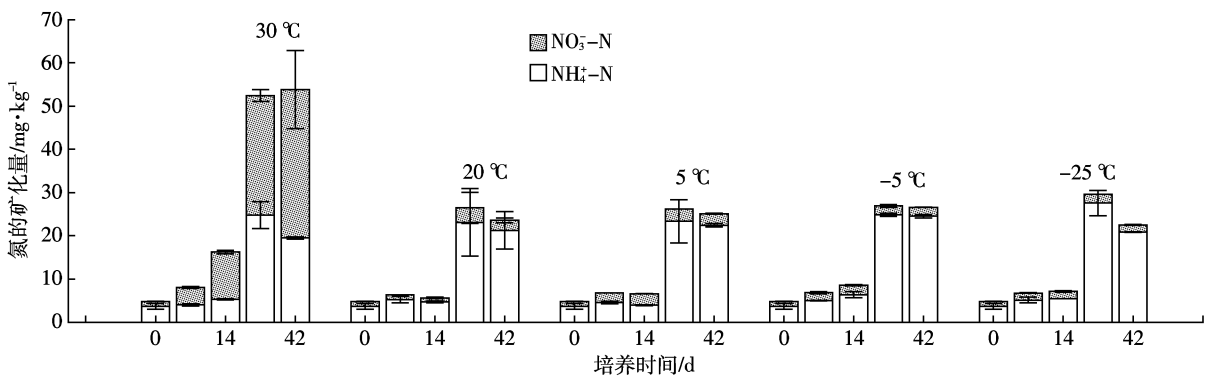


图 1 温度对土壤氮素矿化累积量的影响

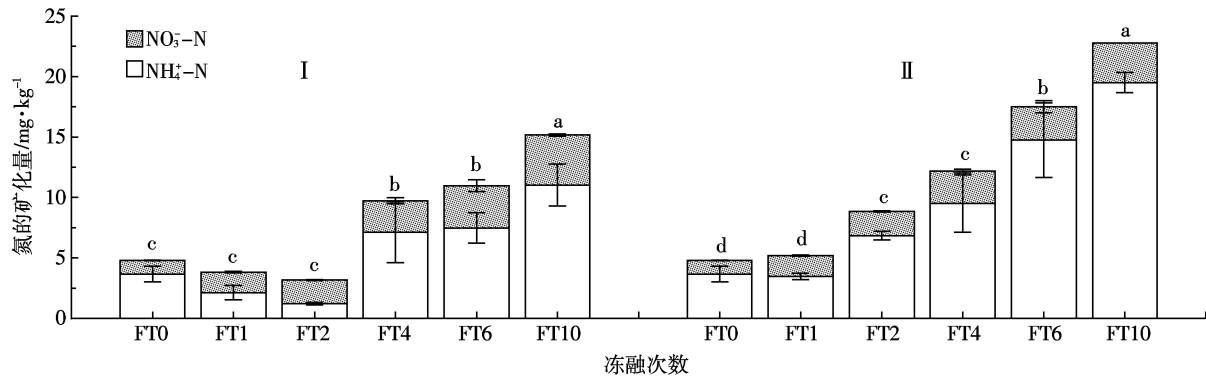
Figure 1 The effects of temperature on soil nitrogen mineralization quantity

表 1 温度和时间对土壤净氮矿化的 ANOVA 结果

Table 1 ANOVA results of the effect of temperature and time on the soil net nitrogen mineralization

变异来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	方差 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
温度 <i>T</i>	7 279.9	4	1 819.9	158.5	<0.001
时间 <i>t</i>	1 365.6	4	341.4	29.7	<0.001
温度×时间 <i>T</i> × <i>t</i>	1 206.4	16	75.4	6.6	<0.001

注:α=0.05;R²=0.945。



I : -5~5 °C冻融循环, -5~5 °C freeze-thaw. II : -25~5 °C冻融循环, -25~5 °C freeze-thaw.

a、b、c 表示差异性显著 $P<0.05$, 下同。

图 2 冻融循环对土壤氮矿化的影响

Figure 2 Effect of different freeze-thaw cycles on the nitrogen mineralization

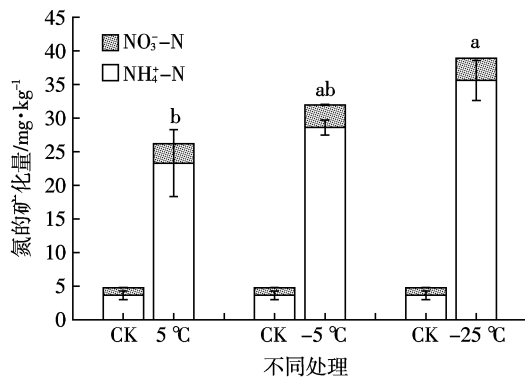


图 3 冻融条件对土壤氮矿化的影响

Figure 3 Effect of different freeze-thaw condition on the nitrogen mineralization

中矿化氮累积量($P=0.033$),但-5~5 °C 冻融处理与 5 °C 对照处理之间无显著差异($P>0.05$)。该结果表明冻融对土壤氮的矿化有促进作用,这与 Herrmann 等和 Neilsen 等的研究结果一致^[12,17]。不同处理土壤中矿化氮的累积量以铵态氮为主,硝态氮累积量差异不大。

两种不同冻融处理后,其土壤中氮的矿化量都表现为铵态氮含量较高,而硝态氮变化较小。如前所述,这与土壤的理化性质有关。此外,已有研究表明,土壤冻融交替作用影响土壤结构,会导致粘土晶格的开

放,释放出固定的 NH_4^+ ^[16],而小叶章湿地土壤的粘土含量较高(39.32%)^[9],这也可能是造成铵态量含量较高的一个影响因素。

3 讨论

3.1 温度变化对土壤氮矿化的影响

在实验室条件下,氮素矿化、硝化和铵化对温度响应的试验可以避免植物吸收和淋溶损失,且多数试验发现土壤温度升高促进土壤氮循环^[7]。Standford 等应用长期间歇淋洗的方法建立了温度和矿化速率的关系,结果表明,在一定温度范围(-4~40 °C)内,随着温度的升高,氮矿化数量和矿化速率均增大^[11]。周才平等对森林土壤中有机氮矿化的温度和湿度效应进行了研究,发现在 5~25 °C 的温度范围内,氮的矿化速率与温度正相关^[9]。王常慧等对草地土壤氮矿化研究结果表明,在低温(-10~15 °C)时,土壤有机氮矿化不明显,但 15~35 °C 之间,氮素的矿化量明显上升^[8]。本研究中,温度对湿地土壤氮素的矿化速率和硝化速率影响显著(表 1),30 °C 时的矿化速率和硝化速率显著高于其他温度(图 1)。这主要是由于土壤中有有机氮的矿化受土壤微生物活性影响,而土壤微生物受温度影响显著^[3,8]。此外,30 °C 时的硝化速率显著提高,主要

表 2 冻结温度和冻融次数对土壤氮矿化的 ANOVA 结果

Table 2 ANOVA results of the effect of freeze temperature and number on the soil net nitrogen mineralization

变异来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	方差 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
冻结温度 T	119.62	1	119.62	41.5	<0.001
冻融次数 N	516.19	5	163.23	56.6	<0.001
温度×次数 $T \times N$	56.70	5	11.34	3.9	0.012

注: $\alpha=0.05$; $R^2=0.915$ 。

是由于土壤中矿质氮形态的转化过程,也随着温度的升高而加快,铵态氮仅在低温条件下能在土壤中累积,温度越高越能促进硝化作用^[8,15]。

对小叶章湿地土壤而言,在不考虑水分等环境因子情况下,在较低温度下(-25℃和-5℃)仍有矿化发生,表明在寒冷的冬季,湿地土壤中仍可能存在有机氮的矿化过程。Schimel等在美国 Alaska 苔原草地研究结果也表明,虽然冬季低温限制了土壤氮的转化过程,但仍有氮矿化发生^[18]。由于冬季植物对土壤氮素的吸收减少,低温下矿化过程提高了土壤中矿化氮的累积,这为次年春季植物生长提供足够的氮素^[19]。

土壤净氮矿化量随着培养温度升高和培养时间的延长而增加。但在-25℃至20℃之间,培养6周后,土壤中氮的净矿化量反而有下降趋势,其原因可能是:(1)由于反硝化产生的气态损失;(2)微生物固持铵根离子(NH_4^+)和硝酸根离子(NO_3^-),使得净氮矿化下降;(3)土壤中氮素矿化量积累,抑制土壤有机氮的进一步矿化,使得土壤矿化量增加缓慢或降低;(4)试验误差造成的^[8,15]。总体看来,温度是主要制约因子。在考虑温度因素情况下,小叶章湿地土壤室内净氮矿化的测定培养时间范围在4~5周内较为适宜。

3.2 冻融对土壤氮矿化的影响

研究表明,多次冻融过程,微生物量C虽然减少但微生物量N并没有减少,而细胞外酶在-20℃仍存在活性,说明在低温生态系统中,微生物可以忍受多次冻融过程^[20]。已有不少有关冻融对土壤氮矿化方面的研究,多是在低于0℃下培养一段时间后或冻融多次后,再在0℃以上温度下培养,研究土壤中矿化氮的变化^[12,16]。他们的研究结果都表明,冻融有利于土壤中矿质氮的增加。其原因在于冻融对土壤矿化的影响同干湿或氯仿熏蒸结果相似,冻融过程杀死一部分微生物,造成其细胞破裂,矿质氮的释放直接来自土壤微生物^[16];其次,由于死亡微生物为残留的微生物提供了足够的基质,刺激了微生物活性,有利于对土壤有机氮的矿化过程^[17];土壤中非来自微生物的有机质对矿质氮也有贡献,Freppaz等认为,冻融可能导致土壤中以前不可利用的有机和无机胶体中 NH_4^+-N 的释放^[21]。冻融对微生物伤害作用和非来自微生物的有机质对矿质氮的作用,可以解释-25~5℃冻融循环条件下,土壤有机氮的矿化量高于-5~5℃冻融循环条件下土壤有机氮的矿化量。

在冻融2次前,-5~5℃冻融循环下有机氮矿化量反而降低,这可能与土壤气态氮的损失有关。已有

许多研究表明,冻融过程可提高土壤反硝化过程, N_2O 排放量增加^[22]。此外,冻融虽然短期内可以提高土壤呼吸,但加剧了土壤活性碳的损失,而土壤活性碳的减少,可能促进冻融过程中土壤矿化氮的增加^[12],因此,多次冻融后土壤有机氮的矿化反而增加。不同冻融处理下,土壤中的矿化氮都以 NH_4^+-N 为主,这与冻融导致土壤中 NO_3^--N 浓度降低有一定的相关性^[12,23]。冻融过程虽然提高了 NH_4^+-N 浓度,增加了土壤硝化底物,但由于自养硝化细菌对环境变化较为敏感,且恢复较慢,硝化反应减弱^[12]。相反,冻融过程中反硝化过程加强,导致 N_2O 排放显著增加^[22],使得反硝化过程强于硝化过程,不利于 NO_3^--N 的累积^[12]。

4 结论

温度和培养时间对湿地土壤有机氮的矿化有显著影响,高温条件有利于湿地土壤有机氮的矿化和硝化。在-25~30℃的温度范围内,土壤净矿化速率和硝化速率随着温度的升高呈指数增加。三江平原小叶章湿地土壤氮矿化的最佳温度是30℃,而培养时间控制在4~5周较为适宜。

冻结温度和冻融循环次数促进了湿地土壤有机氮的矿化。冻融循环有利于土壤氮的矿化,对春季植物生长有重要意义。在冬季低温条件下,土壤有机氮矿化较弱,矿化氮的累积量较少,而春季时植物的生长需要大量的无机氮素。此时土壤经过多次冻融循环,可促进土壤氮素矿化过程,增加土壤中无机氮含量,满足了植物快速生长对土壤中无机氮的需求,对维持湿地生态系统的稳定具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王常慧,邢雪荣,韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11):2184-2188.
WANG Chang-hui, XING Xue-rong, HAN Xing-guo. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11):2184-2188.
- [2] De Neve, Hartmann R, Hofman G. Temperature effects on N mineralizing changes in soil solution composition and determination of temperature coefficients by TDR[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54: 49-61.
- [3] 周才平,欧阳化. 温度和湿度对长白山两种林型下土壤氮矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4):505-508.
ZHOU Cai-ping, OU Yang-hua. Influence of temperature and moisture on soil nitrogen mineralization under two types of forest in Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(4):505-508.
- [4] Puri G, Ashman M R. Relationship between soil microbial biomass and

- gross N mineralization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 251–256.
- [5] Niklinska M, Maryanski M, Laskowski R. Effect of temperature on humus respiration rate and nitrogen mineralization; Implications for global climate change[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 44: 239–257.
- [6] Cookson W R, Cornforth I S, Rowarth J S. Winter soil temperature (2–5 °C) affects on nitrogen transformations in clover green manure amended or unamended soils: A laboratory and field study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1401–1415.
- [7] Dalias P, Anderson J M, Bottner P, et al. Temperature responses of net nitrogen mineralization and nitrification in conifer forest soils incubated under standard laboratory conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 691–701.
- [8] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 温度和湿度对我国内蒙古羊草草原土壤净氮矿化的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2472–2476.
WANG Chang-hui, XING Xue-rong, HAN Xing-guo. The effects of temperature and moisture on the soil net nitrogen mineralization in an *Aneurolepidium chinensis* grassland, Inner Mongolia, China[J]. *ACTA Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2472–2476.
- [9] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型小叶章湿地土壤氮素净矿化与硝化作用[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1771–1777.
SUN Zhi-gao, LIU Jing-shuang. Soil nitrogen net mineralization and nitrification in typical *Calamagrostis angustifolia* wetlands in Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1771–1777.
- [10] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying–rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 777–787.
- [11] Stanford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potentials of soils[J]. *Soil Sci Soc Amer Proc*, 1972, 36: 465–472.
- [12] Neilsen C B, Groffman P M, Hamburg S P, et al. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 1723–1730.
- [13] Nicolardot B, Recous S, Mary B. Simulation of C and N mineralization during crop residue decomposition: A simple dynamics model based on the C:N ratio of the residue[J]. *Plant and Soil*, 2001, 228: 83–103.
- [14] Mario E B, Bob D P, Paul E N. Grazing intensity and ecosystem processes in a northern mixed–grass prairie, USA[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8: 469–479.
- [15] Amador J A, Görres J H, Savin M C. Role of soil water content in the carbon and nitrogen dynamics of *Lumbricus terrestris* L. burrow soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 28: 15–22.
- [16] Deluca T H, Keeney D R, McCarty G W. Effect of freeze–thaw events on mineralization of soil nitrogen[J]. *Biol Fertil Soils*, 1992, 14: 116–120.
- [17] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze–thaw cycles in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 1495–1505.
- [18] Schimel J P, Billbrough C, Welker J M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 217–227.
- [19] Tierney G L, Fahey T J, Groffman P, et al. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 175–190.
- [20] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze/thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21: 187–195.
- [21] Freppaz M, Williams B L, Edwards A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: implications for N and P availability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 35: 247–255.
- [22] Müller C, Martin M, Stevens R J, et al. Processes leading to N₂O emissions in grassland soil during freezing and thawing[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 1325–1331.
- [23] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, et al. Freeze–thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub–arctic heath tundra mesocosms [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 641–654.