

温度和湿度对我国内蒙古羊草草原 土壤净氮矿化的影响

王常慧, 邢雪荣*, 韩兴国*

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘要:土壤氮素的矿化是反映土壤供氮能力的重要因素之一,也是目前国内外研究的热点。通过测定内蒙古典型羊草草原自由放牧地土壤净氮矿化量和净氮矿化速率,揭示影响草地生态系统土壤氮循环过程的有关机理,为草地生态系统建模提供理论依据。在实验室条件下,运用恒温恒湿培养箱控制土壤的温度与湿度,测定羊草草原长期自由放牧地土壤氮素矿化量的积累。将不同水分含量的土柱分别放在温度为-10℃、0℃、5℃、15℃、25℃和35℃的恒温恒湿培养箱中培养,培养1、2、3、5周后取出,分析培养前后的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,以确定土壤净氮矿化($\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}$)的累积和不同时间段内的矿化速率。结果表明:不同处理温度和水分之间的差异均达到显著水平($p<0.0001$)。温度和水分之间具有显著的交互作用($p<0.0001$)。随着培养时间的延长,矿化氮累积量增加,但是矿化速率下降。

关键词:羊草草原;净氮矿化;温度;湿度;培养时间

The effects of temperature and moisture on the soil net nitrogen mineralization in an *Aneulolepidium chinensis* grassland, Inner Mongolia, China

WANG Chang-Hui, XING Xue-Rong*, HAN Xing-Guo* (Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2472~2476

Abstract: Net nitrogen (N) mineralization determines soil N availability, which limits plant growth and productivity. A better understanding of the effects of temperature and moisture on soil N mineralization will facilitate the prediction of soil N cycling and primary productivity in grasslands. The objective of this study was to evaluate the effects of temperature (T) and soil moisture (M) on N mineralization in a typical steppe ecosystem in Inner Mongolia, China. Soil cores were kept in PVC tubes and adjusted to different soil water contents, and then incubated at different temperatures for 7, 14, 21 and 35 d. The results showed that the accumulation quantity and rate of soil net N mineralization were significantly related to the temperature effects ($p<0.001$). At lower temperatures (-10℃, 0℃, 5℃), the net N mineralization rate was not statistically different irrespective of the incubation periods. However, net N mineralization rate increased with temperature at higher temperature (15℃, 25℃, and 35℃). Soil moisture also significantly affected net N mineralization. Among the three moisture contents (0.15kg/kg, 0.25kg/kg, 0.35kg/kg), the net N mineralization rate was the highest at the moisture content of 0.25kg/kg. The rate of net N mineralization showed a high variability under different incubation periods (1, 2, 3, 5 weeks). Soil incubated for 1 week had the highest mineralization rate whereas N mineralization accumulation quantity was largest at 3-weeks. When

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(0330150); 国家科技攻关计划资助项目(2002BA517A11-7); 中国科学院知识创新工程重要方向性资助项目(KZCX2-413 和 KSCX2-SW-120)

收稿日期:2003-12-26; **修订日期:**2004-09-24

作者简介:王常慧(1974~),女,山西人,博士生,主要从事生物地球化学循环和草地生态学研究。E-mail:chwang0901@hotmail.com

* **通讯作者** Authors for correspondence. E-mail:xghan@ibcas.ac.cn

致谢:本研究的野外采样和室内实验得到中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站有关人员的大力协助,在此表示衷心的感谢

Foundation item: Key Project of National Foundation (No. 0330150); Sun-project of Science and Technology Tackle Key Problems of National Science and Technological Department (No. 2002BA517A11-7); Knowledge Innovation Funds from Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-413 and KSCX2-SW-120)

Received date: 2003-12-26; **Accepted date:** 2004-09-24

Biography: WANG Chang-Hui, Ph. D. candidate, mainly engaged in biogeochemical cycle and grassland ecology.

temperature was 35 C and moisture was 0.25kg/kg, the accumulation of soil nitrogen mineralization was the highest during 21d incubation. With incubation time prolonged, the N mineralization accumulation increased, but the rate of net N mineralization decreased. These results suggested interactive effects of temperature, moisture and incubation time on the quantity and the rate of net N mineralization.

Key words: *Aneulolepidium chinensis* grassland; net nitrogen mineralization; temperature; moisture; incubation time
文章编号:1000-0933(2004)11-2472-05 中图分类号:Q143 文献标识码:A

土壤中有机氮的矿化和硝化直接或间接地受多种因素的影响,土壤温度、含水量、土壤pH值、土壤易分解基质的C/N比、矿化和硝化过程本身是否有抑制物质存在,以及参与分解的有机质的量等^[1~4]。氮素矿化过程主要有微生物参与,微生物种群的大小、活性与以上因素密切相关。土壤的温度和水分含量是影响土壤有机质分解和矿化的主要环境因子,多年来各国生态学家在此方面做了大量的工作,尤其在实验室控制土壤的温度和水分研究土壤氮素的矿化过程成为国际上普遍采用的方法。近年来国外有关这方面的报道很多^[4~7],根据这些结果也得出许多可参考的模型方程。我国在这方面的研究工作不少,但是建立的模型很少考虑的环境因素对氮矿化的影响,尤其是在草原生态系统,迄今为止还未见此方面的模型报道。本研究结合国外相关实验方法并根据当地实际情况对内蒙古典型羊草草原土壤氮素矿化进行了一系列研究,目的是为草地生态系统研究提供参考资料。对于草原生态系统,土壤中氮素的矿化速率强烈地受到放牧强度的影响,放牧强度越大,土壤中的净氮矿化率越低^[8]。本文的采样点属于过度放牧区。

1 实验材料与方法

1.1 实验地概况

采样点位于中国东北温带森林-草原样带西段的锡林郭勒典型草原区,是该样带研究的重点区域之一。锡林河流域位于内蒙古高原中部,羊草草原群落样地位于内蒙古锡林河流域的中部,锡林河上游丘陵区及本区南部三级熔岩台地地势较高,气候半湿润,草群具丰富的中生杂类草,发育了草甸草原,土壤为暗栗钙土。中游地区地势渐低,雨量减少,气候半干旱,草群以中旱生或旱生杂类草为主,旱生丛生禾草占绝对优势,发育了典型草原。采样点的样地坐标为43°32′58″N、116°40′34″E,海拔1265 m。土壤为暗栗钙土,土层深厚达1 m以上。多年平均气温为0.5 C,年降雨量为347±79.6 mm^[9]。据2003年7月样方调查,该地的主要植物种有10余种,广旱生根茎禾草羊草(*Aneulolepidium chinensis*)为群落的建群种。

1.2 采样方法

选择地势平坦,相对具有代表性的样地,划分间隔2m,面积为10 m×10 m的小区5个,作为5个重复样地。在2003年7月中旬,用内径为5 cm的PVC管分别在5个小区随机采集原状土柱,采样深度为10 cm(不包括枯落物层)。采样时,先将地上部的植物和凋落物清除干净,然后将一端削尖的PVC管用力迅速砸入地下10 cm,尽量不破坏土壤的原状结构,然后将管取出,用聚乙烯膜封口。在距取样的PVC管3~5cm处,同样用内径为5cm的土钻取10cm深的土,装入封口袋中带回实验室分析,作为该管土样培养前的初始值。

1.3 实验室培养

把采集到的PVC管中的土样带回实验室,当日将管和土一起称重计算,用注射器在土柱中缓慢注入适量蒸馏水调节土壤含水量分别到0.15,0.25kg/kg和0.35kg/kg(重量含水量),置于-10 C、0 C、5 C、15 C、25 C和35 C的恒温恒湿培养箱中,每个处理共设5个重复。为保持土壤样品的湿度和空气流通,将PVC管的两端用保鲜膜封住,多数实验表明保鲜膜具有适度的透气性,并能减少水分的传递过程^[10]。分别在1、2、3和5周后取出土柱,分析其硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)的含量,计算在一定时间内累积的矿化氮的量和净矿化速率。

1.4 化学分析

土壤全N测定用凯氏消煮法后,再用全自动凯氏定氮仪(2300 KJELTEC, FOSS, SWEDEN)测定;有机碳用重铬酸钾外加热氧化法测定;铵态氮和硝态氮用2M KCl溶液浸提,浸提液用全自动微量流动注射仪(FLASTAR5000, FOSS, SWEDEN)测定,水分用105 C,24h烘干法测定,pH值用pH计法(水:土=10:1),容重用环刀法。测定结果均以干重计。

1.5 计算与统计方法

(1)计算方法 土壤净氮矿化量=培养后的无机氮(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)-培养前的无机氮(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)
矿化速率=[培养后的无机氮(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)-培养前的无机氮(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)]/培养时间
(2)数学分析方法 采用数理统计中方差分析(ANOVA)以及线性回归方法对实验数据进行了分析,使用的工具软件主要是SAS和EXCEL

2 结果与讨论

2.1 结果

2.1.1 研究样地土壤概况 以往多数实验室培育土壤研究氮素矿化都是先将土壤过筛后再进行培养, Sierra^[12]研究表明,在这种受过干扰的土壤中比未受干扰的土壤氮素矿化更容易发生,可能的原因是增加了土壤透气性,有利于土壤中硝化细菌的活动,所得到的结果有一定的误差。本研究在尽量不破坏土壤原状结构的情况下将土壤采集在PVC管中,目的是和田间实验对比,使其具有可比性。实验用土壤理化特性见表1。

2.1.2 净氮矿化的积累 在实验过程中,虽然有保鲜膜封住PVC管两端来保持土壤的湿度,但实验过程中还是难免有水分的散失,而且散失的水分随着初始含水量和培养温度的升高而增加,尤其是在35℃条件下培养35d后,所以培养期间土壤含水量会发生变化,但根据实验最后测得的结果,这种变动最大时没有超过5%。文章中作图和分析不同含水量下,净矿化量和净矿化速率对温度的反应用的是初始的土壤含水量。

图1表示的是羊草草原土壤在不同的温度,水分和不同的时间段内培养,无机氮积累的变化情况。可以看出,氮素的矿化累积量对培养温度和水分反应都很积极,差异均达到极显著水平($p<0.0001$)。但是无论土壤水分含量是多少,培养时间多长,氮素矿化量在-10~15℃之间对温度的反应很微弱,而在15~35℃之间时,氮素的矿化量明显上升,这解释了土壤微生物在较高的温度下活性大的特性,可以推断其活性的临界温度大约是15℃左右。这与Miklinska^[7],周才平^[10,11]等的研究结果基本一致。Miklinska^[7]在欧洲赤松林的研究发现微生物活性的临界点大约是20℃左右,而周才平在长白山阔叶红松林和云冷杉林土壤矿化速率方面的研究也发现,微生物活性的临界点大约在15~20℃之间。

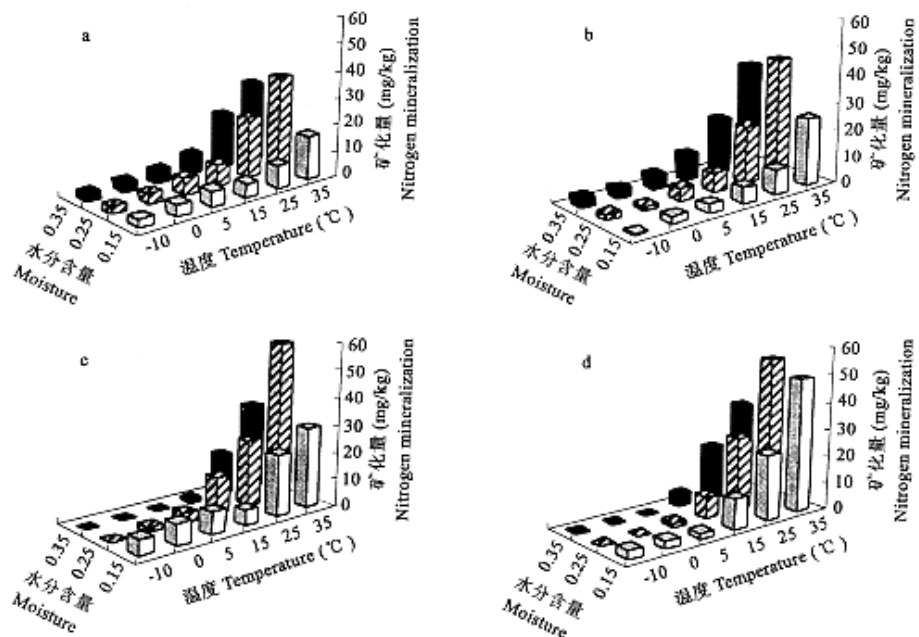


图1 不同温度、不同含水量对土壤氮素矿化累积量的影响

Fig. 1 The effects of temperature and soil moisture on soil nitrogen mineralization quantity under the moisture of 0.15, 0.25kg/kg and 0.35kg/kg

a 培养1周 incubated 1 week; b 培养2周 incubated 2 weeks; c 培养3周 incubated 3 weeks; d 培养5周 incubated 5 weeks

图1还可看出,随着水分含量的上升,氮素矿化量的累积亦呈上升趋势。但除了培养两周的土壤在水分为0.35kg/kg 是矿化量达到最高外,另外数据和5周的培养都出现0.25kg/kg 水分含量时氮素矿化量的值高于0.35kg/kg 水分含量的矿化量。可能的原因:土壤含水量升高时,土壤中氧气含量降低,导致厌氧菌如反硝化细菌的作用增强,进而使得土壤中部分无机氮以气体形

式散失^[13,14]。当温度升高时,这些细菌的活性也增强,气体的散失量增加,土壤净氮累积量下降。该结果与周才平, Quemada 和 Cabrera^[4]的研究结果相符。周才平的实验结果是:在温度为25℃,含水量为0.40kg/kg时,净矿化达到最高值;当温度达到35℃,土壤含水量超过0.20kg/kg时,矿化量反而随湿度增加而下降。而 Quemada 和 Cabrera^[4]的试验结果是含水量小于0.12kg/kg时,土壤矿化量随湿度升高而增加,超过0.12kg/kg时则下降。不同土壤田间最大持水量不同,土壤微生物种群适应不同的土壤环境。所以不同的实验得出的最适含水量不同。

2.1.3 净氮矿化速率 图2给出了不同培养时间段内净氮矿化速率的变化趋势。从图中可知,在不同的含水量条件下,净氮矿化速率均随温度升高而呈上升趋势,随培养时间的延长而下降,在3个水分含量情况下,1周的矿化速率最大,且1周与2周、3周和5周之间差异达到显著($P<0.001$)。当土壤水分含量为0.25kg/kg时的矿化速率与含水量是0.15、0.35kg/kg之间差异极显著($P<0.001$)。说明接近0.25kg/kg的含水量,是羊草草原土壤发生矿化的适宜湿度,适合微生物活动。

2.2 讨论

2.2.1 净氮矿化累积、矿化速率与温度和湿度的关系

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,并用两周培养法探讨了土壤水分对矿化量的影响。结果表明,在一定温度范围(-4~40℃)内,随着温度的升高,氮矿化数量和矿化速率均增大,矿化速率系数 K 与水分含量符合直线关系,矿化量随水分含量升高而增加。许多学者的培养实验进一步证明:温度 and 水分与矿化速率有明显的正交互作用,它们之间的二元二次回归方程为:

$$K = 10^{-3}(1.6067 - 0.1221t - 0.0778w + 0.0028t^2 + 0.0012w^2 + 0.0056tw)$$

式中, t 为温度(℃), w 为含水量式中可一次性求出不同温度、不同含水量下的 k 值,为定量预报不同作物的生育期土壤氮素矿化提供了一个简便的途径。

除对农田土壤有机氮矿化过程进行研究外,周才平等对森林土壤中有有机氮矿化的温度和湿度效应进行了研究。结果表明,在5~25℃的温度范围内,氮的矿化速率与温度和湿度呈正相关,当温度超过25℃,含水量超过0.2kg/kg土时,净氮矿化速率随温度和含水量的升高反而降低。此外,傅高明等通过实验证明:土壤中矿质氮形态的转化过程也随温度的升高而加快,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,铵态氮和硝态氮在土壤中的含量及矿质氮形态的转化均极大地受温度的影响。

羊草草原的栗钙土与周才平研究的森林土壤有所不同,周才平的研究是温度超过25℃时,净矿化速率反而降低,而结果是在实验所测的35℃范围内,净氮矿化速率都是增加的(见图2)。这与 Standford 的研究结果一致。说明不同土壤中微生物区系是不同的,造成发生矿化的温度和湿度有所差异。实验结果也表明,温度和湿度与土壤氮素矿化速率之间存在显著的正相关(见表3),且具有显著的交互作用。温度,湿度,时间三者之间也存在极显著的交互作用。

2.2.2 氮矿化速率与干扰强度 有机氮的矿化是在多种微生物的作用下完成的,包括细菌、真菌和放线菌等,可以在好气和嫌气条件下进行。在通气良好、温度和酸碱度适中的砂质土壤上,矿化速率较大,且积累的中间产物少。研究所用的是典型草原的暗栗钙土,其中砂质成分较多,所以矿化速率较快。在实验过程中,0.35kg/kg的水分含量在总体上表现出的劣于0.25kg/kg水分含量的矿化速率,可以用以下原因来解释:土壤氮可通过两个机制形成气体氮——反硝化作用和氨挥发。反硝化作用实质上是硝化作用的逆过程,其条件需要严格的土壤嫌气环境,试验表明,随着土壤溶液中的溶解氧浓度减少,反硝化的强度逐渐加

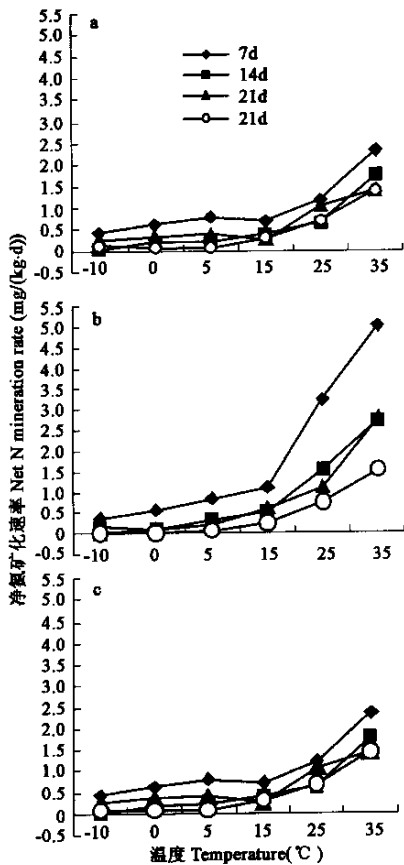


图2 温度变化对土壤氮素矿化速率(mg/(kg·d))的影响

Fig. 2 The effect of change in temperature on nitrogen mineralization rate (mg/(kg·d)) under different incubation time and moisture

土壤含水量 Soil water content: a 0.15kg/kg; b 0.25kg/kg; c 0.35kg/kg

强,待氧浓度减少到5%以下时,反硝化强度明显增高。实际上这种土壤已经处于水分饱和的淹水状态,孔隙中几乎已经不存在空气了。一般认为,50%土壤的田间持水量是微生物活动的最佳水分条件。所用土壤的田间持水量是在土壤水分含量为0.35kg/kg时,还不是淹水状态,但是超过了田间最大持水量,土壤结构间的非毛管孔仍然充有空气,从实验结果可以看出在这种情况下土壤硝化作用和反硝化作用同时存在。研究表明,反硝化的最适pH值是7.0~8.2,而所用的土壤pH值恰在这个范围,所以在0.35kg/kg水分含量的条件下,矿化氮累积量低于0.25kg/kg水分含量是由于反硝化作用引起的。

土壤水分和温度对土壤氮矿化速率产生较大的影响,高温和相对干燥可能有利于土壤氮的矿化。所以土壤温度和湿度的共同作用对氮素矿化要比单独的温度或湿度的影响大。研究表明当土壤温度在3~9℃时,矿化速率对温度并不敏感,但温度在9~15℃时,矿化速率可以增加2倍以上^[15]。研究也表明低温(-10~5℃)时,氮素矿化速率很低,但是当温度升高到15℃时,矿化速率迅速升高,出现了一个拐点。

References:

[1] Miller R D, Johnson D D. Effects of soil moisture tension on carbon dioxide evolution, nitrification and nitrogen mineralization. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1964, **28**: 644~647.

[2] Stanford G, Smith S J. Nitrogen mineralization potential of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1972, **36**: 465~472.

[3] Kladvivko E J, Keeney D R. Soil nitrogen mineralization as affected by water and temperature interaction. *Biol. Fertil. Soils*, 1987, **5**: 248~252.

[4] Quemada M, Cabrera M L. Temperature and moisture effects on C and N mineralization from surface applied clover residue. *Plant and soil*, 1997, **189**: 127~137.

[5] Holland E A, Townsend A R, Vitousek P M. Variability in temperature regulation of CO₂ fluxes and N mineralization from five Hawaiian soils; implication for a changing climate. *Global Change Biology*, 1995, **1**: 115~123.

[6] MacDonald N W, Zak D R, Regitzer K S. Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, **59**: 233~240.

[7] Miklinska M, Maryanski M, Laskowski R. Effect of temperature on humus respiration rate and nitrogen mineralization: implications for global climate change. *Biogeochemistry*, 1999, **44**: 239~257.

[8] Biondini M E, Patton B D, Nyren P E. Grazing intensity and ecosystem processes in a northern mixed-grass prairie, USA. *Ecological application*, 1998, **8**(2): 469~479.

[9] Bai Y F, Chen Z Z. Effects of long-term variability of plant species and functional groups on stability of a *Leymus Chinensis* community in the Xilin River Basin, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*. 2000, **24**(6): 641~647.

[10] Zhou C P, Ouyang H. Effect of temperature on nitrogen mineralization at optimum and saturated soil water content in two types of forest in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(9): 1469~1473.

[11] Zhou C P, Ouyang H. Temperature and moisture effects on soil nitrogen mineralization in deciduous broad-leaved forest. *Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(2): 204~209.

[12] Sierra J. Relationship between mineral N content and N mineralization rate in disturbed and undisturbed soil samples incubated under field and laboratory conditions. *Aust. J. Soil Res.*, 1992, **30**: 477~492.

[13] Aulakh M S, Doran J W, Walters D T, *et al.* Legume residue and soil water effects on denitrification in soils of different textures. *Soil Biol. Biochem.*, 1991, **23**: 1161~1167.

[14] Rice C W, Sieraega P E, Tiedje J M, *et al.* Simulated denitrification in the microenvironment of a biodegradable organic water injected into soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, **52**: 102~108.

[15] Nadelhoffer K J, Giblin A E, Shaver G R, *et al.* Effects of temperature and substrate quality on element mineralization in six arctic soils. *Ecology*, 1991, **72**: 242~253.

参考文献:

[9] 白永飞,陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响. *植物生态学报*, 2000, **24**(6): 641~647.

[10] 周才平,欧阳华. 长白山两种主要林型下土壤氮矿化速率与温度的关系. *生态学报*, 2001, **21**(9): 1469~1473.

[11] 周才平,欧阳华. 温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响. *植物生态学报*, 2001, **25**(2): 204~209.

表3 羊草草原土壤净氮矿化速率的ANOVA结果

Table 3 General factorial ANOVA results of the soil net mineralization rate

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 Pr>F
校正模型 Corrected model	375.53	71	5.29	14.32	0.0001
温度 T	759.05	5	151.81	411.24	0.0001
湿度 M	17.46	2	8.73	23.66	0.0001
温度×湿度 T×M	36.10	10	3.61	9.87	0.0001
时间 t	109.37	3	36.45	98.76	0.0001
温度×时间 T×t	65.56	15	4.37	11.84	0.0001
湿度×时间 M×t	27.67	6	4.61	12.49	0.0001
温度×湿度×时间 T×M×t	23.77	30	0.79	2.15	0.0001
误差 Error	106.32	288	0.37		
总和 Total	488.53	359			

$\alpha=0.05; R^2=0.805$