

# 温度对内蒙古典型草原土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响\*

杜睿 吕达仁 王庚辰 万小伟

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 在草原植物生长期, 利用不同深度(2, 8 和 15 cm)不锈钢管原位采集原状土壤样品以及用土钻采集表层(0~15 cm)混合土壤, 在室内温控培养箱内进行温控模拟实验, 研究温度对内蒙古温带半干旱典型草原(羊草草原)土壤 N<sub>2</sub>O 产生速率的影响。结果表明: 温度对于 N<sub>2</sub>O 的产生速率有着显著的影响, 随着土壤深度的增加, 温度对土壤 N<sub>2</sub>O 产生速率的影响力在减弱。不同生长阶段的草原土壤 N<sub>2</sub>O 的产生速率对于短期内温度变化的响应具明显的差别; 同时结合野外原位观测实验结果, 定量地研究了草原土壤 N<sub>2</sub>O 的排放通量与温度之间的相互作用关系, 发现两者之间不仅存在线性关系, 通过多组实验数据的回归分析还准确地阐明了温度的升高与降低对于不同深度的土壤 N<sub>2</sub>O 产生速率的影响, 即两者之间的作用关系。

**关键词** 温度 草原土壤 N<sub>2</sub>O 产生速率

草原生态系统作为陆地生态系统的主要组成部分之一, 其温室气体的排放对于全球气候变化的贡献及其在地球生物化学循环过程中的作用, 日益成为当前地球与生命科学界所共同关注的前沿科学问题之一<sup>[1]</sup>。由于等摩尔浓度的 N<sub>2</sub>O 的增温潜势是 CO<sub>2</sub> 的 290 倍<sup>[2]</sup>, N<sub>2</sub>O 的温室效应对全球气候变化有着重要的影响。在生物形成 N<sub>2</sub>O 的过程中, 微生物的硝化和反硝化作用被认为是最基本的机理<sup>[3]</sup>。研究认为温带土壤和森林裸地是碳、氮的重要库源, 微生物的代谢活性是土壤中碳、氮循环的主要控制因子, 同时也决定着土壤对于植物所需的碳和营养物质的转换过程中所充当着源或汇的角色。温度是调控微生物碳、氮循环过程的最重要的控制因子之一<sup>[3]</sup>。

由于研究草原生态系统 N<sub>2</sub>O 排放的起步较晚, 迄今为止, 有关环境因子(温度、水分)与 N<sub>2</sub>O 通量间的相互关系进行定量化的研究报道尚鲜见。羊草草原作为欧亚大陆草原东缘的特征草原, 在我国内蒙古东部以及东北地区有着广泛的分布, 在温带草原中具有较强的代表性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 土壤样品的采样位点与采集方法

已有的研究表明: 草原土壤在春、夏两季, N<sub>2</sub>O 的产生和排放通量均是全年中较高的时期<sup>[4,5]</sup>。而研究区的 4 和 8 月份分别是草原植物生长物候期的春季(返青期)和夏季(结实期), 此时无论是地上植物的生长还是地下土壤微生物的活性, 都处于较活跃与旺盛阶段, 同时草原的天气状况也经常变化, 尤其是温度时常出现骤升骤降的现象, 在室内模拟这种气候条件下, 草原土壤 N<sub>2</sub>O 的产生速率在短时间内对温度变化的响应规律有着极强的代表性; 另外, 9 月中旬则进入草原植物生长物候期的冬季(立枯期), 此时土壤-植物系统处于相对停滞阶段, 采集此时的原状土柱, 可近似的模拟草原全年的土壤温度变化对于 N<sub>2</sub>O 产生的影响, 以上研究对于正确估算草原土壤 N<sub>2</sub>O 年排放量以及建立排放模型都有着重要意义。

土壤样品的采集地点与野外原位通量的观测点相同, 在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站(43°37'N, 116°38'E)设立的温带典型草原羊草草原围栏永久样地内<sup>[5]</sup>。1998 年 9 月在采样箱基座附

2002-06-05 收稿, 2002-07-24 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 40005009, 40075028, 49790025)和中国科学院大气物理研究所创新领域前沿(8-3305)共同资助项目

E-mail: ruidu 2000@yuhoo.com

近, 选取 2 m × 2 m 样方, 将内径为 2 cm 的不同长度(2, 8 和 15 cm)的不锈钢管齐地面垂直楔入土壤表层内, 再用铁锹将土柱钢管起根挖出, 擦净钢管外壁的土壤, 用密封塑料袋包裹密封, 每种长度的钢管有 15 个重复, 置于 -20℃ 的冰柜内保存 2 个月后, 进行模拟实验. 2001 年 4 月和 8 月在相同的位点, 利用土钻随机采 0~15 cm 土层样品, 每次采样重复 25~30 个, 随即将土壤过 2 mm 孔土筛, 用密封塑料袋将过筛土壤样品密封保存于 -20℃ 的冰柜内, 2 个月后取出活化进行实验. 采集样品时测定土壤温度  $\theta$ 、土壤中水的质量百分比  $w$ , 而土壤的有机质、硝态氮和铵态氮的含量, 在运回实验室后测定.

### 1.2 室内模拟培养

1998 年利用原状土柱进行模拟培养, 目的是尽量保持样品的土层结构与野外田间的一致性, 使室内模拟结果更具有田间的代表性. 2001 年利用过筛原样土进行培养实验, 在尽可能保持田间土壤的理化特性的基础上, 排除其他干扰因素, 简化影响因素, 以便得到研究目标的实验结果.

表 1 供试土壤的理化特性<sup>a)</sup>

采样时间	$\theta/^\circ\text{C}$ (15 cm)	$w/\%$	$w_{\text{有机质}}/\%$	硝态氮 /mgkg <sup>-1</sup>	铵态氮 /mgkg <sup>-1</sup>
1998 年 9 月	14.1	10.0	3.30	40	7.10
2001 年 4 月	7.2	7.1	3.14	5.71	8.19
2001 年 8 月	18.4	19.5	3.06	16.25	8.80

a) 由中国农业科学院土壤肥料研究所测试中心对所采集土壤样品进行测试分析

将 1998 年 9 月中旬所采集的原状土柱从 -20℃ 的冰柜内取出, 置于 0℃ 的储藏箱内保存 24 h, 随后将每种 15 个同样高度的土柱分成 3 组, 分别放入 3 个体积相同的广口培养瓶内. 用 750, 1250 和 1000 mL 的广口培养瓶分别装高为 2, 8 和 15 cm 的土柱. 将 3 种土层深度的 3 组重复分别置于设置温度为 -10℃、体积是 150 L 的温控培养箱内(置放前培养箱内充分通气, 以保证培养箱内的气体成分与实验室内空气近似相同), 培养瓶敞口培养 12 h 后取出, 用小吹风机将瓶内气体与室内空气进行置换, 然后迅速将瓶口密封, 重新放入 -10℃ 的培养箱内继续培养 12 h 后, 将密闭培养瓶取出, 抽取瓶内气体, 再将瓶口打开, 重新放入已被迅速换气的培养箱内继续培养 36 h, 然后采用前述同样的密闭方法将敞口培养的培养瓶密闭培养 12 h

后, 取出采集气体, 再敞口培养 36 h. 重复上述的培养与采集过程, 直至第 3 次采集完毕. 然后将敞口的培养瓶置于温度新设置为 5℃ 的培养箱内, 再次重复上述 3 次培养与采集过程. 每次所采集的气体随即用 HP5890 气相色谱仪进行气体样品中 N<sub>2</sub>O 含量的分析. 通过以上的实验方法, 依次将样品在 5 个设置温度按照 (-10℃ → 5℃ → 15℃ → 23℃ → 30℃ → 23℃ → 15℃ → 5℃ → -10℃) 顺序进行循环培养, 每个设置温度下连续培养 5 d, 分别在培养的第 1, 3, 5 d 时进行采集和分析气体实验, 以此模拟田间土壤在不同的温度条件下, N<sub>2</sub>O 产生速率的变化情况. 同时也测定了不同深度的表层土壤对于土壤 N<sub>2</sub>O 排放的贡献.

将采集的 2001 年 4 月与 8 月土壤样品从 -20℃ 的冰柜内取出, 置于 4℃ 的储藏箱内保存 48 h 后, 分别称量 60 g 土壤样品装入体积 300 mL 的细口径培养瓶内, 每种样品 3 个重复. 称量完毕后, 敞口置于温度设置为 8℃ 的温控箱内, 24 h 后取出, 通气、盖塞, 开始密闭培养, 又 24 h 后再取出, 抽取瓶内气体, 并打开瓶口放回设置温度调整为 13℃ 的温控箱内, 敞口培养 24 h 后, 再密闭培养 24 h. 如此反复, 按照不同的设置温度(8℃ → 13℃ → 18℃ → 23℃ → 28℃ → 23℃ → 18℃ → 13℃ → 8℃) 的顺序依次循环培养, 测定在每个设置温度下培养 48 h 后土壤 N<sub>2</sub>O 的产生速率.

### 1.3 气体通量的计算

气体产生速率( $f$ )用如下公式计算:

$$f = \frac{\Delta m}{M \times \Delta t} = \frac{\rho \times v \times \Delta c}{M \times \Delta t}$$

式中  $\rho$  为气体密度,  $\Delta m$  和  $\Delta c$  分别为  $\Delta t$  时间内培养瓶内气体质量和混合比浓度变化,  $v$  为培养瓶内有效空间体积,  $M$  为土壤鲜重.

每种实验设计土壤样品培养均是 3 个重复, 每次气体样品采集亦均是 3 个重复, 通量的计算均包括平均值与标准偏差的计算( $n=3$ ).

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度对不同深度原状土柱 N<sub>2</sub>O 产生速率的影响

已有的研究表明: 草原土壤 N<sub>2</sub>O 主要由上层地表土壤所产生, 地表温度和  $w$  成为影响草原土壤

$N_2O$  排放通量的重要环境因素<sup>[6]</sup>. 图1是不同深度土层的土壤在不同的温度条件下, 培养24h后土壤 $N_2O$ 产生速率的变化情况. 表层不同深度的土壤 $N_2O$ 产生速率对于温度变化的响应具有明显的差别. 随着土层深度的增加, 土壤 $N_2O$ 产生速率对于温度变化响应的敏感性明显降低, 它对温度变化的响应相对稳定(图1).

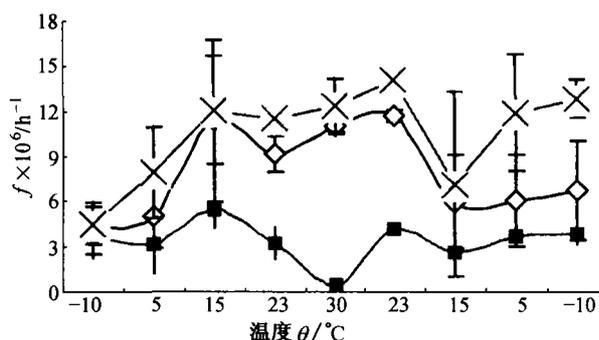


图1 温度对羊草草原不同深度表层土壤 $N_2O$ 产生的影响

◆ 2 cm, ■ 8 cm, × 15 cm

实验表明: 一般情况下, 表层土壤 $N_2O$ 产生速率的较合适的温度范围是在15~25°C. 浅表层(2 cm)与中表层(8 cm)土壤 $N_2O$ 产生速率对于温度变化的响应较为复杂. 在一定的范围内, 温度的升

高促进了土壤 $N_2O$ 的产生速率, 温度的降低土壤 $N_2O$ 产生速率也将减弱, 但两者间并不是简单的线性关系(图2). 图2(a)是不同土层的原状土柱随着培养温度由低温(-10°C)逐渐升高时, 温度与土壤 $N_2O$ 产生速率的变化两者间的关系. 浅表层(2 cm)土壤 $N_2O$ 产生速率与温度的升高呈指数关系,  $f = 5.3675e^{0.0262a}$ ,  $r = 0.89$ ; 中表层(8 cm)土壤 $N_2O$ 产生速率与温度的升高(x)呈两阶多项式关系,  $f = -0.0061Q^2 + 0.1648Q + 4.5148$ ,  $r = 0.81$ ; 15 cm表层土壤 $N_2O$ 产生速率与温度的升高呈线性关系,  $f = 0.0204Q + 0.704$ ,  $r = 0.95$ ; 图2(b)是不同土层的原状土柱随着培养温度由高温(30°C)逐渐降低时, 土壤 $N_2O$ 产生速率与温度变化两者间的关系, 浅表层(2 cm)土壤 $N_2O$ 产生速率与温度的降低呈线性关系,  $f = 0.1338Q + 6.4613$ ,  $r = 0.74$ ; 8 cm中表层和15 cm表层土壤 $N_2O$ 产生速率与温度的降低均呈两阶多项式关系,  $f = -0.003Q^2 + 0.0033f + 3.8481$ ,  $r = 0.70$  和  $f = 0.007Q^2 - 0.0145Q + 1.072$ ,  $r = 0.53$ . 原状土柱培养方法直接反映表层土壤垂直剖面土壤 $N_2O$ 产生速率随温度的升高与降低的变化情况是完全不同的, 例如: 相同的土壤(2 cm浅表层土壤) $N_2O$ 产生速率与温度的升高呈指数关系而与温度的降低则呈线性关系.

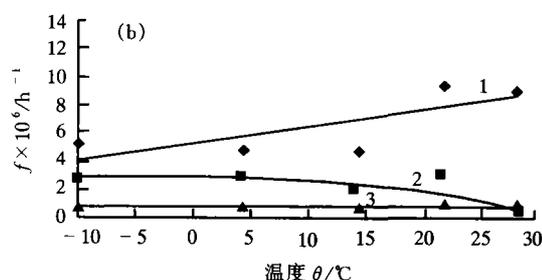
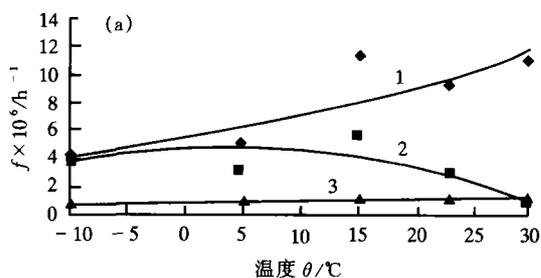


图2 温度变化对表层土 $N_2O$ 产生速率的影响

(a) 升温, ◆ 2 cm, ■ 8 cm, ▲ 15 cm, 1. 指数 2 cm, 2. 多项式 8 cm, 3. 线性 15 cm;

(b) 降温, ◆ 2 cm, ■ 8 cm, ▲ 15 cm, 1. 指数 2 cm, 2. 多项式 8 cm, 3. 多项式 15 cm

尽管我们进行的是单因子隔离分析研究, 温度对于土壤 $N_2O$ 产生速率的影响仍然是复杂多变的(图3). 在温度循环培养周期中, 土柱越浅土壤 $N_2O$ 产生速率对于温度变化的响应越显著, 此现象也证实了在内蒙典型草原土壤中, 土壤 $N_2O$ 的产生主要是由于土壤微生物的硝化作用而产生的观点<sup>[7]</sup>, 即越接近表层, 土壤的透气性越好, 越有利于好氧的硝化作用发生, 而

且同一温度下, 土壤微生物硝化作用活性随培养时间的延长活性逐渐减弱. 随着土层深度的增加, 土壤的透气性减弱, 既不利于硝化作用发生, 同时也不利于 $N_2O$ 的排放, 所以在同一温度下, 土层愈浅 $N_2O$ 的排放愈大; 在-10°C的条件下, 表层土壤仍具有可被检测的 $N_2O$ 产生速率, 温度的模拟实验也解释了在冬季盖雪的情况下仍然可测到 $N_2O$ 的排放通量.

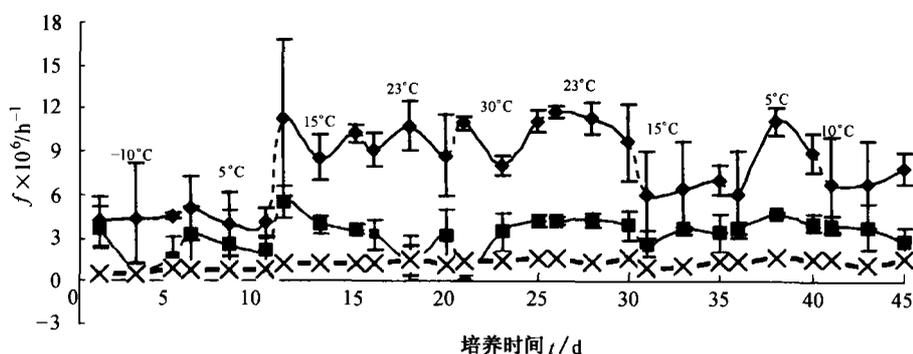


图3 温度对羊草草原不同深度表层土壤 N<sub>2</sub>O 产生率的影响

◆ 2 cm, ■ 8 cm, × 15 cm

### 2.2 温度对表层混合土壤 N<sub>2</sub>O 产生速率的影响

由于表层土壤 N<sub>2</sub>O 的产生速率对于温度变化的响应各不相同, 为了进一步解释温度对于土壤表层 N<sub>2</sub>O 的产生的作用规律, 选择土壤 N<sub>2</sub>O 排放的具有代表性的两个高峰季节(春季、夏季)采集 0~15 cm 表层混合土壤样品再次进行温度模拟循环培养实验. 根据当地的气象观测资料和当地春、夏两季的气候特点在 8~28°C 模拟设置 5 个培养温度.

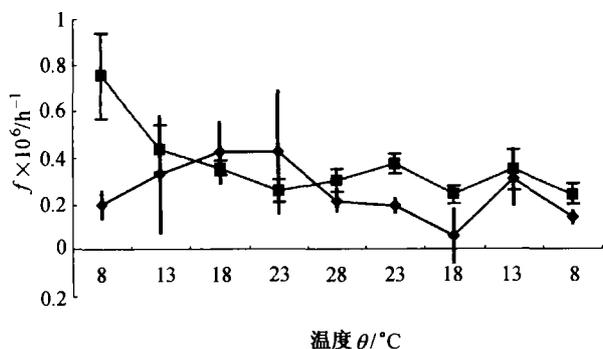


图4 温度对草原不同季节土壤 N<sub>2</sub>O 产生的影响

◆ 8月, ■ 4月

实验结果(图4)表明: 采自不同季节的相同土壤 N<sub>2</sub>O 的产生速率对于温度变化的响应各不相同, 土壤 N<sub>2</sub>O 的产生速率对于温度的升高具有非常显著的相关性. 通过回归分析发现, 草原春季和夏季的表层土壤 N<sub>2</sub>O 的产生速率在实验温度范围内与温度的升高两者间具有二阶多项式关系, 春季土壤  $f = 0.002Q^2 - 0.0935Q + 1.359$ ,  $r = 0.99$ ; 夏季土壤  $f = -0.0022Q^2 - 0.0824Q + 0.337$ ,  $r = 0.97$ ; 但两者对于温度的降低则不具有显著的相关性, 反应更复杂. 将表层 0~15 cm 混合土壤与土柱的温度模

拟循环培养实验结果相比较可以发现: 过筛混合土壤样品在温度循环培养实验过程中 N<sub>2</sub>O 的产生速率较相同深度的原状土柱平均约降低 80%. 排除土壤样品采集的时间, 土壤本身的营养成分以及土壤微生物的影响因素, 这种实验结果表明土壤结构的改变, 对于土壤温室气体的产生具有明显的影响, 和保护草原生态系统时, (人类在利用、开垦草地)必须解决好资源利用与环境保护之间的矛盾.

### 2.3 温度对草原土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响

以 1998 年草原植物生长季节观测期间 N<sub>2</sub>O 排放通量<sup>[5]</sup>为例, 分析其对于温度变化的响应规律. 图5是温度对羊草草原 N<sub>2</sub>O 排放通量日变化的影响. 选择羊草草原 4 个不同的生长物候期中具代表性的观测日的原位观测结果, 比较可以得出: 不论是箱内气温, 地表温度还是土壤 20 cm 处地温对于羊草草原土壤-植物系统 N<sub>2</sub>O 排放通量日变化的影响都较为显著, 总的说来, N<sub>2</sub>O 排放通量随着 3 种

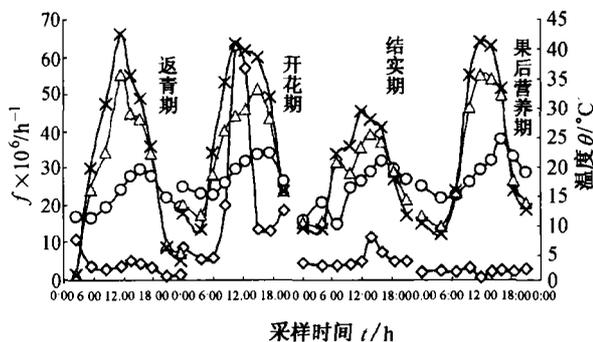


图5 草原土壤 N<sub>2</sub>O 通量日变化与温度的关系

◇ N<sub>2</sub>O 通量, ○ 地下温度, △ 地表温度, × 空气温度

不同温度的升高, 在不同程度上都有一定的升高, 但是并不具备明显的线性相关. 这是由于虽然温度直接影响着土壤中产生  $N_2O$  的微生物生理代谢活性, 但  $N_2O$  排放量并非取决于其产生速率, 土壤  $O_2$  的供应状况和反应底物的有效性, 其他的环境因素都会对它产生影响, 是多因子的协同作用结果.

表2 草原不同生长物候期温度对于草地  $N_2O$  排放通量( $f$ )的作用关系

生长物候期	地下温度( $x_u$ )	地表温度( $x_s$ )
返青期	$f = -0.0518Q_u^3 + 2.6429Q_u^2 - 44.181Q_u + 244.77$ $r = 0.60$	$f = -0.0024Q_s^3 + 0.1522Q_s^2 - 2.7571Q_s + 15.055$ $r = 0.84$
开花期	$f = -1.4403Q_u^3 + 78.734Q_u^2 - 1414.1Q_u + 8371.3$ $r = 0.98$	$f = -0.0261Q_s^3 + 1.7123Q_s^2 + 12.542Q_s - 216.33$ $r = 0.65$
结实期	$f = -0.013Q_u^3 + 0.6776Q_u^2 - 10.99Q_u + 59.656$ $r = 0.63$	$f = 0.0151Q_s^3 - 0.7682Q_s^2 + 12.542Q_s - 61.096$ $r = 0.97$
果后 营养期	$f = -0.0003Q_u^3 + 0.0168Q_u^2 - 0.323Q_u + 3.706$ $r = 0.49$	$f = 0.0069Q_s^3 - 0.3931Q_s^2 + 7.2888Q_s - 42.367$ $r = 0.36$

从表2分析的结果中同样发现: 温度与草地  $N_2O$  排放通量两者间的作用关系是一种较复杂的多项式关系. 这主要是由于温度是通过影响微生物的生理代谢活性而调节产生  $N_2O$  的微生物过程, 而产生  $N_2O$  的主要微生物过程又是复杂多变的,  $N_2O$  既是硝化作用过程的中间产物也是反硝化作用过程的中间产物, 而此两种过程既可同时发生, 也会各自产生, 再者野外条件下其他的环境因子(水分、养分、通气状况、pH值等)同样影响和调节着土壤微生物过程, 从而导致野外观测数据的分析结果与室内的模拟实验结果两者间的非一致性.

由于草地  $N_2O$  的产生和排放过程主要是由于土壤微生物的作用过程而产生, 从图5中可以明显地看出, 同一温度在不同的生长期  $N_2O$  的排放通量是完全不同的, 这是由于草原不同生长物候期微生物的生理代谢活性也各不相同, 例如, 在果后营养期, 由于即将进入冬季立枯期, 微生物的生理代谢活性开始降低到休眠状态, 所以, 温度对于  $N_2O$  的产生和排放的调节作用明显降低, 两者间的相关系数也明显降低, 达不到显著水平; 并且  $N_2O$  的产生和排放与温度变化间存在滞后效应, 所以, 温度对于生命过程的影响具有一定的正相关性, 但很难简单归纳为线性关系. 由于野外多因子的作用效果, 室内的模拟实验结果也仅仅能部分解释温度对于  $N_2O$  的产生和排放的调节作用关系.

### 3 结论

由于研究对象是复杂的多因子协同作用的生命

将羊草草原4个不同的生长物候期中  $N_2O$  排放通量的原位测定结果与同步观测的两种不同的环境温度(由于短时间的箱内的空气温度作用效应是通过影响地表温度而影响其排放的, 故仅对直接作用因子地表温度与地下温度)进行了回归分析, 表2中是回归分析的拟合方程.

系统, 单纯地研究温度对于草地  $N_2O$  的产生和排放的作用关系, 将各种实验结果通过数据分析发现, 两者之间存在阶段性的非连续函数关系; 在草原不同的生长物候期两者之间均存在多项式相关(生长期不同, 土层深度的变化, 对于其多项式相关关系都具有不同的影响), 所以对于复杂系统中的单因子研究, 在研究方法的选择上, 应该更多的关注其阶段性的变化, 研究结果才能更真实反映实际情况. 而更进一步针对温度对于微生物的硝化与反硝化的代谢活性的研究对于揭示两者间的作用关系的研究从反应机制上具有更强的说服力.

### 参 考 文 献

- 1 吕达仁, 等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用——科学问题与实验计划概述. 气候与环境研究, 1997, 2(3): 199
- 2 Houghton J T, et al. IPCC, Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific Assessment, Supplementary Report. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 3
- 3 Firestone M K, et al. Microbiological Basis of  $NO$  and  $NO_2$  Production and Consumption in Soil. Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. Chichester: John Wiley and Sons 1989. 7
- 4 Insam H. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime? Soil Biol Biochem, 1990, 22: 525
- 5 杜睿, 等. 内蒙古温带半干旱羊草草原温室气体  $N_2O$  和  $CH_4$  通量变化特征. 自然科学进展, 2001, 11(6): 595
- 6 Denmead O T, et al. Studies of nitrous oxide emission from a grass sward. Soil Sci Soc Am J, 1979, 43: 726
- 7 杜睿, 等. 内蒙古典型草原土壤  $N_2O$  产生的机理探讨. 中国环境科学, 2000, 20(5): 387