

太湖地区农田 NO 排放不连续测量最佳时间*

郑循华, 王明星, 王跃思(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 以我国南方太湖地区稻麦轮作生态系统的旱地阶段为例, 在通过自动连续测量揭示 NO 排放的时间变异规律性基础上, 讨论了 NO 排放不连续测量结果矫正及最佳观测时间选择. 根据自动连续测量结果, NO 排放表现出日间极大值型和夜间极大值型2种规律性日变化形式. 前者发生在温度比较适宜, 但植物生长较弱的情况下, 此日变化形式直接与温度有关; 后者发生在植物旺盛生长的情况下, 且主要取决于植物对铵态氮的吸收, 而与温度没有直接关系. 在植物生长强弱变换的过渡期, 日变化的规律性不明显. 不连续测量结果的矫正因子也因植物生长状况而异. 当观测时间选择不当, 又不进行任何矫正处理时, 根据不连续测量结果估计的 NO 排放可能偏高12%~47%或偏低18%~68%. 无论哪种植物生长情形, 15:00~16:00都是 NO 排放不连续测量的最佳观测时间. 这时的观测结果不需要日变化矫正, 能直接用来代表日平均排放量.

关键词: NO 排放, 日变化, 不连续测量, 最佳观测时间.

中图分类号: X132 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)01-0001-06

Diurnal Variation of NO Emission from an Ecosystem and the Optimum Observation Time for Intermittent Flux Measurement*

Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi(The State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Based on a continuous *in situ* measurement with an automated system during the non-flooding period of the rice-wheat rotation ecosystem, which is a typical agricultural ecosystem in South China, the diurnal variability of NO emission was analyzed theoretically. Then correction of results from intermittent measurement and the optimum time for intermittent observation were discussed. There are two types of diurnal variation patterns of NO emission from the investigated crop ecosystem. One is day-peak pattern and another is night-peak pattern. The former continuously occurs under situations with low plant activity and is mainly determined by temperature. The latter, which does not directly depend on temperature, usually occurs under situations with intensive plant activity and is primarily determined by up-take of soil ammonium by plant roots. During the transition period, when plant activity gradually decreases, almost no diurnal variation occurs regularly. Correction coefficients are closely correlated to situations of plant activity. If the time for intermittent measurement is not selected perfectly and no correction is performed for the measured data, the NO emission from the investigated ecosystem may be overestimated by 12%~47% or underestimated by 18%~68%. No correction is necessary for measurements carried out at 15:00~16:00, which is recommended as the optimum time for intermittent measurement under any situation of plant activity.

Keywords: NO emission, diurnal variation, intermittent measurement, optimum observation time.

施肥农田是仅次于汽车尾气^[1,2,6,8]的大气 NO 人为排放源^[1]. 全球农田的 NO 排放量正在随氮肥使用量而增加, 预计这将是21世纪的一个重要环境问题. 过去的研究表明, 生态系统的 NO 排放存在巨大的季节变化和日变化^[3,7,9]. 所以, 观测结果的代表性如何, 直接与

* 973 预选项目 PD9522(预)及国家自然科学基金项目(Project Supported by the National Natural Science Foundation of China): 49675270, 49975027, 参加该项工作的还有沈王兴、李老土、金继生、李晶、刘广仁、张文、白建辉等.

作者简介: 郑循华(1964~), 女, 四川省名山县人, 博士, 中国科学院大气物理所副研究员, 主要从事大气微量气体的陆气交换过程研究.

收稿日期: 1999-03-11

观测时间有关. 目前的观测技术包括自动连续测量^[3]和手动不连续测量^[9]2种. 迄今为止, 绝大多数 NO 排放测量仍采用手动不连续测量方法. 本文在通过自动连续测量揭示 NO 排放的时间变异规律性基础上, 讨论不连续测量结果的矫正及最佳观测时间选择.

1 研究方法

实验设于苏州市南郊(31°16'N, 120°38'E)太湖地区典型水稻土上的冬小麦田, 施肥、耕作等处理均依照当地常规方式^[4]. 冬小麦于11-01播种, 次年05-27收割, 20d 后田间淹水种稻.

在稻麦轮作周期内的整个旱地阶段(从11-01到翌年的06-17), 全天候地连续进行 NO 排放的自动连续观测^[4]. 观测系统用9个采样箱, 每3个一组依次对9个点位进行观测, 每组一次观测60min, 2组观测之间空闲20min, 每4h完成一次所有点位的观测. 这样, 每个点位1d共观测6次, 2次相间4h, 以6次观测的平均结果代表每个点位的日平均排放通量. 在观测 NO 排放的同时, 自动观测系统还每10min记录一次箱内外气温和不同深度的土壤温度.

在分析和认识 NO 排放的时间变异规律性基础上, 通过对自动连续测量结果进行统计分析, 确定 NO 排放不连续测量结果的矫正因子及最佳观测时间.

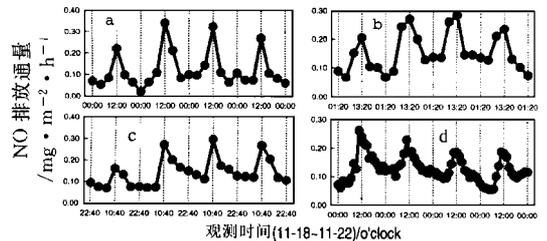
2 结果与讨论

2.1 NO 排放的日变化形式及其随季节分布

图1a~c显示了小麦苗期同一块麦田不同点位连续4d的 NO 排放通量观测结果. 显然, 3个点位的 NO 排放均显示出非常显著的日变化, 其日排放极大值分别稳定地出现在10:40~11:40、12:00~13:00和13:20~14:20. 将3个点位的 NO 排放通量观测值按观测时间先后顺序串联起来(如图1d), 仍可以看出, 连续4d的 NO 排放日变化形式完全相同, 且日排放极大值均发生在12:00左右. 将不同点位不同时间的测量数据串联起来可以得到极其显著的日变化规律性, 这表明, 对于一块耕作和施肥处理均相同的

均一麦田, 1日内 NO 排放的时间变异性明显大于其空间变异性.

采用与图1d相同的方法将整个观测阶段3个点位的自动连续测量值按时间序列串联起来, 其结果如图2所示. 根据 NO 排放日变化形式的差异, 可将太湖地区稻麦轮作田的旱地阶段划分成5段, 分别为入冬前的小麦苗期、越冬期、返青至齐穗期、开花灌浆期、成熟期及小麦收割后的裸露休闲期, 各个阶段典型的 NO 排放日变化形式分别如图2a~e所示.



a. 点位 A, 各点观测时间为00:00~01:00、04:00~05:00, 依此类推 b. 点位 B, 01:20~02:20、05:20~06:20, 依此类推 c. 点位 C, 02:40~03:40、06:40~07:40, 依此类推 d. 3个点位按观测时间串联在一起, 各点观测时间为00:00~01:00、01:20~02:20、02:40~03:40、04:00~05:00, 依此类推

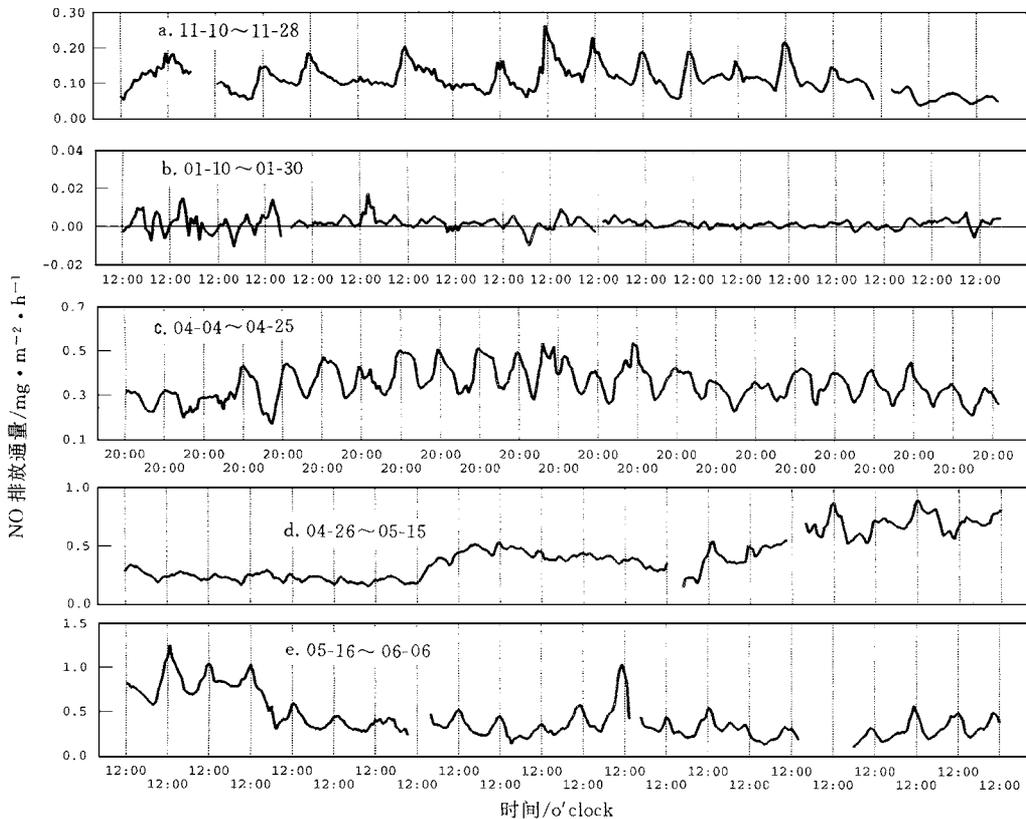
图1 小麦苗期同一块麦田3个点位测得的 NO 排放日变化

在越冬期, 低温使 NO 排放通量通常都低于自动观测系统的检测下限 $0.004\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 通常观测不到 NO 排放的日变化规律性(图2b), 因而以下的讨论均不考虑这一阶段.

如图3所示, 在发生显著 NO 排放的阶段, 主要有2种规则性 NO 排放日变化形式. 一种是日间极大值型, 另一种是夜间极大值型. 日间极大值型通常在白天午时左右出现日排放极大值, 夜间的排放较低且相对稳定. 这种形式通常连续地发生在入冬前的小麦苗期、成熟期以及小麦收割后的休闲期(图2a、e). 夜间极大值型通常在傍晚到午夜之间出现日排放极大值, 而白天午时左右通常出现日排放极小值. 这种形式通常连续发生在小麦返青至抽穗期(图2c). 从小麦开花到成熟之前, 本文称之为过渡阶段. 这一阶段的 NO 排放时而为日间极大值型, 时而为夜间极大值型, 且极大值出现的时间不稳

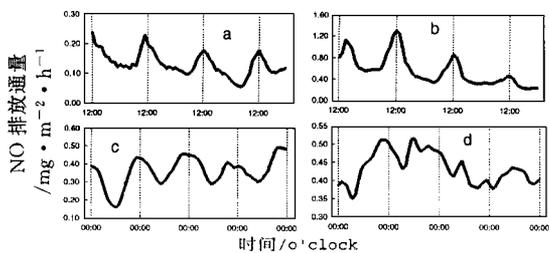
定(如图2d),有时甚至观测到双峰型日变化(图 化;之后,为日间极大值型日变化(如图2).
 3d).过渡阶段之前,为夜间极大值型日变

2.2 NO 排放日变化形式的决定因素



a. 越冬前的小麦苗期 b. 越冬期间 c. 春季小麦旺盛生长期
 d. 小麦从旺盛生长期向成熟期的过渡阶段 e. 小麦成熟期及其后的裸露休闲阶段

图2 稻麦轮作周期内未淹水期间各阶段的NO 排放日变化



a. 小麦苗期 b. 成熟期及裸地休闲期
 c. 返青至抽穗期 d. 开花灌浆期

图3 3种典型的NO 排放日变化

图4a 和 c 是小麦苗期和拔节期连续几天的 NO 排放通量观测和拟合结果,它们代表着典型的日间极大值型和夜间极大值型日变化情

形. 图4b 和 d 是相应的表层土壤温度观测值. 具有典型日间极大值型日变化的 NO 排放通量 ($F, \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 变化轨迹可以用正弦曲线函数 $F = 0.0016T \times \sin(0.2618t - 1.57) + 0.01T$ 来描述. 函数式中包含了时间 (t, h) 和温度 ($T, ^\circ\text{C}$) 两个自变量. 从图中可以明显看出, 是温度的日变化格局决定了日间极大值型日变化的形式. 具有典型夜间极大值型日变化的 NO 排放可以用另一个正弦曲线函数 $F = 0.06 \times \sin[0.2618(t - 12) - 1.57] + 0.16$ 来很好地描述, 但函数式中只包含了一个自变量, 即时间. 比较图4c 和 d 也可以发现, 这种形式的日变化格局和温度日变化没有直接关系. 显然, 是除温

度以外的其它因素决定着夜间极大值型日变化 格局.

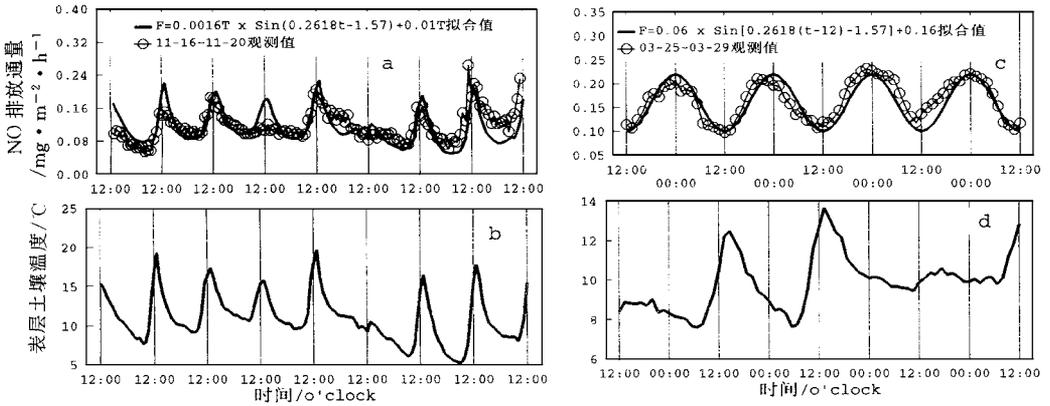
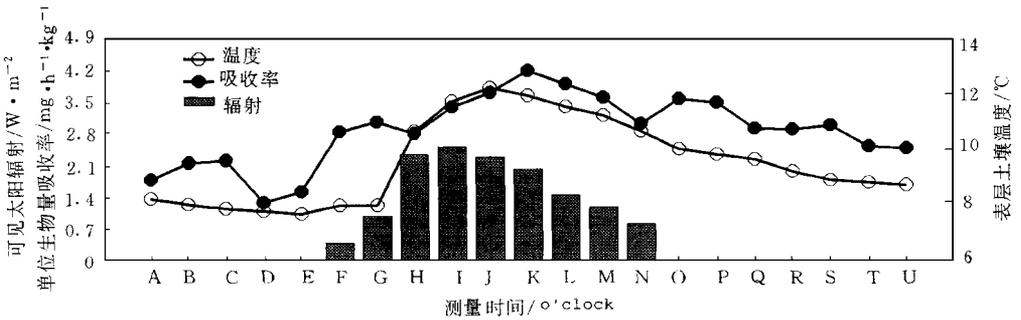


图4 温度对 NO 排放日变化的影响

旱地排放的 NO 主要产生于土壤微生物硝化过程^[9]. 在适宜的土壤温度和湿度条件下, NO 的硝化作用产率直接与土壤 NH₄⁺ 含量有关^[9]. 当植物根系对土壤 NH₄⁺ 的吸收能力较弱时, 如在小麦苗期、成熟期或麦茬休闲期, 土壤中的 NH₄⁺ 主要通过微生物硝化作用而被消耗. 土壤 NH₄⁺ 的矿化补给速率、NO 的硝化作用产率以及 NO 气体在土壤中的扩散传输速率

均依赖于温度^[9], 因此, 这时的 NO 排放具有与表层土壤温度几乎同步的日变化形式. 相反, 在植物生长十分旺盛的情况下, 一部分土壤 NH₄⁺ 被微生物硝化作用消耗, 并产生 NO, 另一部分被植物吸收而不能形成 NO. 植物的吸收越强, NO 排放就越弱, 反之, 亦然. 小麦植株吸收 NH₄⁺ 的日变化几乎与太阳辐射和温度的日变化一致 (图5), 中午前后小麦的光合与蒸腾作



A. 00:00~ 03:00 B. 01:00~ 05:00 C. 02:00~ 06:00 D. 04:00~ 07:00 E. 05:00~ 08:00 F. 06:00~ 09:00 G. 07:00~ 10:00 H. 09:00~ 12:00 I. 10:00~ 14:00 J. 12:00~ 15:00 K. 13:00~ 16:00 L. 14:00~ 17:00 M. 15:00~ 18:00 N. 16:00~ 19:00 O. 17:00~ 20:00 P. 18:00~ 21:00 Q. 19:00~ 21:00 R. 20:00~ 23:00 S. 21:00~ 00:00 T. 22:00~ 01:00 U. 23:00~ 02:00

图5 温度、太阳辐射和小麦吸收土壤铵态氮的速率的日变化

用最强, 植物根系吸收 NH₄⁺ 的速率亦最大, 致使这段时间留在土壤中参与硝化作用的 NH₄⁺ 最少. 因此, 在小麦返青至抽穗期, 中午左右观

测到的 NO 排放通量最小, 而在傍晚至午夜前后却最大. 但是, 在田间的小麦植株分布比较稀疏的情况下, 如小麦生物量仅为正常麦田的1/4

的情形(图6),即使处于小麦生长活动最活跃的生育期,NO 排放仍表现为典型的日间极大值型日变化。

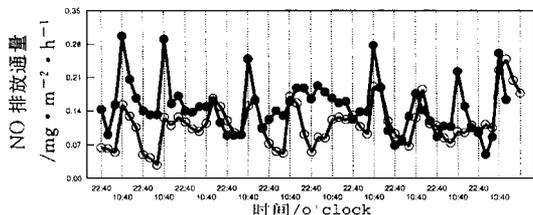


图6 仅为正常小麦生物量的1/4情况下拔节抽穗期的NO 排放日变化

以上分析表明,旱地生态系统的NO 排放日变化形式主要由植物生长状况决定。在植物

生长旺盛时,为夜间极大值型日变化,温度不直接影响其日变化格局;而在植物生长很弱时,则表现为日间极大值型日变化,其日变化格局直接取决于温度;在过渡情形下,尽管NO 排放很显著,但日变化形式却不规律。

2.3 NO 排放不连续测量结果的矫正系数

在NO 排放的手动不连续测量中,通常用一次测量结果代表一天或几天的NO 排放状况。这样的做法往往会过高或过低估计实际的NO 排放。解决问题的一条有效途径就是根据典型生态系统NO 排放的自动连续测量结果确定矫正系数,对一次性不连续测量结果进行日变化矫正。

表1 NO 排放不连续测量矫正系数

时间/o'clock	过渡期		植物旺盛生长		植物生长弱	
	矫正系数	样本数	矫正系数	样本数	矫正系数	样本数
00-00	1.020±0.134	16	0.883±0.187	105	1.180±0.229	82
01-20	1.065±0.105	22	0.936±0.152	96	1.166±0.307	94
02-40	1.071±0.197	20	0.936±0.202	94	1.230±0.278	79
04-00	1.089±0.129	18	0.937±0.187	103	1.281±0.271	84
05-20	1.125±0.085	22	1.021±0.211	96	1.237±0.378	100
06-40	1.153±0.386	20	1.257±0.239	92	1.208±0.301	73
08-00	1.172±0.183	18	1.404±0.241	91	1.110±0.238	85
09-20	1.067±0.070	22	1.351±0.192	88	0.947±0.233	98
10-40	1.010±0.126	20	1.455±0.227	88	0.820±0.197	79
12-00	1.004±0.150	18	1.348±0.277	97	0.772±0.240	86
13-20	1.071±0.098	22	1.191±0.194	88	0.874±0.221	98
14-40	1.001±0.149	20	1.113±0.190	90	0.973±0.255	75
16-00	0.951±0.160	18	1.024±0.188	101	0.979±0.152	84
17-20	0.955±0.073	22	0.926±0.175	96	1.069±0.233	96
18-40	0.952±0.132	20	0.862±0.102	94	1.154±0.251	79
20-00	0.953±0.211	18	0.792±0.121	103	1.166±0.263	84
21-20	0.960±0.093	22	0.859±0.199	96	1.189±0.434	98
22-40	1.000±0.198	20	0.915±0.120	92	1.163±0.254	77

某一时刻的矫正系数定义为自动连续测量结果的日平均值与该时刻的测量值之比。NO 排放的日变化格局因植物生长状况而异,因而矫正因子也会随植物生长状况而变化。根据

NO 排放的日变化规律性,将稻麦轮作生态系统的旱地阶段分为植物生长旺盛、植物生长弱和过渡期3种情形,用统计平均法确定每种情形的矫正系数,结果如表1。这些系数可直接用

于矫正类似生态系统的 NO 排放不连续测量结果. 从表1可见, 如果不连续测量的观测时间选择不当, 又不对测量结果进行矫正, 对 NO 排放的估计就可能偏高12%~47%或偏低18%~68%. 所以, 在观测时间选择不当时, 必须对不连续观测结果加以日变化矫正.

2.4 NO 排放不连续测量的最佳观测时间

测量时间所对应的矫正系数越接近于1, 一次性不连续测量结果就越能直接代表 NO 排放的日平均状况. 这里将矫正系数约等于1的观测时间称为最佳观测时间(见图7).

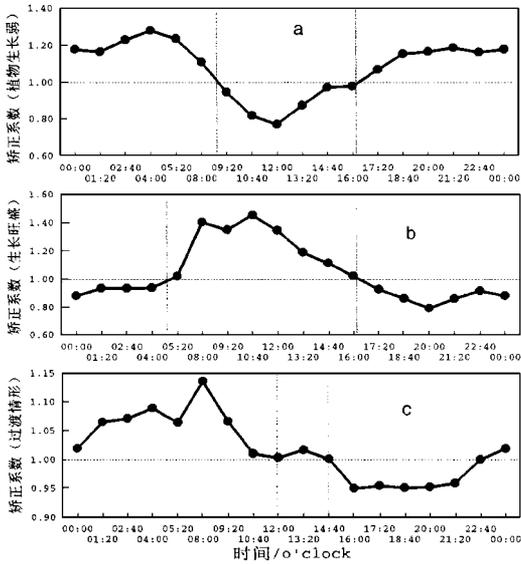


图7 不同情形下矫正系数的时间变化及不连续测量的最佳观测时间

图7分别显示了3种情形的矫正系数日变

化, 并用虚线指示了每种情形的最佳观测时间. 从图中显然可见, 无论对于哪种情形, 15:00~16:00的矫正系数都比较接近于1, 换言之, 在这个时间一次性观测的 NO 排放通量值不需要进行日变化矫正就可以直接用来代表日平均排放通量.

根据以上分析结果, 本文建议太湖地区早作农田的 NO 排放的不连续观测最好选择在15:00~16:00进行.

参考文献

- 1 王明星. 大气化学(第二版). 北京: 气象出版社, 1999. 141~142
- 2 罗超, 周秀骥. 大气 NO_x 循环与收支平衡. 中国应用气象学报, 1993, 4(1): 92~99
- 3 郑循华, 王跃思, 王明星, 沈王兴, 李老土, 金继生. 农田 NO 排放自动观测. 环境科学, 1998, 19(2): 1~5
- 4 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈王兴, 龚宴邦, 骆冬梅, 张文, 金继生, 李老土. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响. 应用生态学报, 1996, 7: 273~279
- 5 郑循华, 王明星, 王跃思. 农田 NO 排放的时间变异性. 环境科学, 1999, 20(2): 17~21
- 6 唐孝炎. 大气环境化学. 北京: 高等教育出版社, 1990. 37~42
- 7 Aneja V P, Robarge W P and Holbrook B D. Measurements of nitric oxide flux from an upper coastal plain, North Carolina agricultural soil. Atmospheric Environment, 1995, 29(21): 3037~3042
- 8 Crutzen Paul J. On the role of CH_4 in atmospheric chemistry: sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources. Ambio, 1995, 24(1): 52~55
- 9 William E J, Hultchinson G L and Fehsenfeld F C. NO_x and N_2O emissions from soil. Global Biogeochemical Cycles, 1992, 6(4): 351~388