

# 应用 DNDC模型估算区域农业土壤 N<sub>2</sub>O释放通量和释放量——以贵州省为例\*

徐文彬<sup>1,2</sup>,洪业汤<sup>2</sup>,陈旭晖<sup>3</sup>, Li Changsheng<sup>4</sup>,林庆华<sup>2</sup>,王羽<sup>2</sup>(1. 浙江大学环境与资源化学研究所,杭州 310027 E-mail: xuwenbin@163.net; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550002; 3. 贵州省农科院土壤肥料研究所,贵阳 550006; 4. Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, Durham, USA)

摘要: 根据 DNDC模型能较好地拟合贵州省玉米-油菜轮作田、大豆-冬小麦轮作田和休耕地的 N<sub>2</sub>O释放通量及其影响因子的季节变化模式,采用 DNDC模型估算了以县为空间分辨尺度的贵州省农业土壤 1995年 N<sub>2</sub>O释放通量和释放量;定量评估了施肥和耕作农业活动对该地区 N<sub>2</sub>O释放量的贡献。本工作将为准确估算我国农业土壤的 N<sub>2</sub>O释放量和提出科学的减排措施提供研究基础和方法参考。

关键词: N<sub>2</sub>O释放, DNDC模型, 农业土壤, 农业活动。

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)02-0011-05

## DNDC Model Estimates of N<sub>2</sub>O Emission from Regional Agricultural Soils——A Guizhou Province Case Study\*

Xu Wenbing<sup>1,2</sup>, Hong Yetang<sup>2</sup>, Chen Xuhui<sup>3</sup>, Li Changsheng<sup>4</sup>, Lin Qinghua<sup>2</sup>, Wang Yu<sup>2</sup>(1. Institute of Environment and Resources Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China E-mail: xuwenbin@163.net, China; 2. State Key Lab of Environ. Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002; 3. Soil and Fertilizer Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006; 4. Institute for the Study of Earth, Oceans, and Space, University of New Hampshire, Durham, USA)

**Abstract** Based on the success of DNDC model elucidating N<sub>2</sub>O emissions and its influencing factors from corn-rape rotation, soybean-winter wheat rotation, and fallow study plots in Guizhou Province, DNDC model was used to estimate N<sub>2</sub>O emission from entire agricultural lands at county scale in Guizhou in 1995, and to assess the contribution of farming practices including fertilizing and tilling on N<sub>2</sub>O emission. This research objective was to explore the potential for using DNDC to identify the magnitude of, and controls on, N<sub>2</sub>O emissions from agriculture in a policy relevant framework in China.

**Keywords** N<sub>2</sub>O emission, DNDC model, agricultural soils, farming practices.

迄今国内仅对水田和北方旱田生态系统进行过少量的 N<sub>2</sub>O释放观测<sup>[1-6]</sup>,通过特定研究点平均释放通量外推法或通过简单的经验模式还远不能准确评估出我国农业土壤的 N<sub>2</sub>O释放总量,也难以提出减排措施。Li等建立的 DNDC模型<sup>[7,8]</sup>(反硝化-分解作用模型)是目前全球最成功的 N<sub>2</sub>O释放机理模型之一,最近美国农业部推荐并采用 DNDC模型估算了以州为空间尺度的美国农业土壤 N<sub>2</sub>O释放量,检验

了未来气候和农业活动变化对释放量的潜在影响<sup>[9,10]</sup>。

本文通过 DNDC模型计算与田间测量在我国南方亚热带代表性旱田土壤——贵州省旱

\* 国家自然科学基金资助项目 (Project Supported by the National Natural Science Foundation of China), 编号: 49873034  
作者简介: 徐文彬 (1969-), 男, 理学博士, 主要从事全球环境变化研究。  
收稿日期: 1999-09-26

田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  释放通量及其影响因子季节变化上的对比分析,一方面进一步检验 DNDC模型对亚热带农业土壤  $\text{N}_2\text{O}$  释放过程的拟合程度;另一方面采用 DNDC模型估算以县为空间分辨率的贵州省农业土壤  $\text{N}_2\text{O}$  释放通量和释放量,并讨论施肥和翻耕农业活动对释放量的贡献.本工作将为采用科学、简便的方法来准确估算我国农业土壤的  $\text{N}_2\text{O}$  释放量和提出科学的减排措施提供研究基础和方法参考.

## 1 研究对象及方法

### 1.1 研究对象和 $\text{N}_2\text{O}$ 释放通量测量方法

选贵州省农科院土肥所试验站(106°66'E, 26°50'N,海拔 1140m)的玉米-油菜轮作田、大豆-冬小麦轮作田和休耕地为试验地.玉米-油菜轮作田和休耕地测量时间从 1995-05-28(玉米播前整地)~1996-05-27(油菜收割),大豆-冬小麦轮作田测量时间从 1995-03-20(大豆播前整地)~1996-05-15(小麦收割),观测期包括了上述 4种旱作的生长期.3试验田各作物施肥量、土壤理化性状、及田间  $\text{N}_2\text{O}$  气样采集方法和  $\text{N}_2\text{O}$  浓度测量方法见另文说明<sup>[11]</sup>.

### 1.2 DNDC模型对土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 释放的模拟过程

DNDC模型主要模拟农业土壤的  $\text{N}_2\text{O}$  释放过程.模型由土壤水热子模型、作物生长子模型、好氧分解作用子模型和厌氧反硝化作用子模型构成.模拟以天(干旱期间)或每小时(降雨期间)为时间步长的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  释放过程.水热子模型根据日气温和降雨,结合土壤物理性质参数,计算整个模拟过程中土壤剖面的温度和湿度变化,计算结果进入其它 3个子模型.作物生长子模型计算作物每日的碳、氮吸收量,及收割后归田作物秸秆的碳、氮量.分解作用子模型模拟日时间步长的有机质分解和硝化作用等过程,计算土壤中可溶性碳和  $\text{NO}_3^-$  等生成量及硝化作用的  $\text{N}_2\text{O}$  生成量.反硝化作用子模型模拟以每小时为时间步长的反硝化过程,并计算  $\text{N}_2\text{O}$  的释放通量. DNDC模型必须结合包括气候、土壤、农业活动和作物等输入参数数据库后才能计算区域土壤  $\text{N}_2\text{O}$  释放情况.有关该模型

的详细结构、方程和输入参数见文献 [7] 说明.

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 DNDC模型拟合与田间测量在 $\text{N}_2\text{O}$ 释放通量及其影响因子季节变化上的对比分析

模型计算结果表明模型基本上捕捉了田间观测到的降雨后 3试验田的主要  $\text{N}_2\text{O}$  释放峰,两者在释放峰的峰值和出现时间上较为相近,两者也具相似的  $\text{N}_2\text{O}$  释放通量季节变化模式(图 1a b和 c),3试验田模型计算与田间测量  $\text{N}_2\text{O}$  通量季节变化的相关系数在 0.72~0.76 间( $n=66\sim 79$ ),经相关系数显著性  $t$  检验,  $P < 0.05$ ,相关性显著.对整个田间观测阶段的  $\text{N}_2\text{O}$  释放量,3试验田模型计算结果约是田间测量结果的 70%~77%,与 Li等<sup>[9]</sup>对佛罗里达州的模拟结果(72%)十分接近.同时,模型计算与田间测量一样,均反映了 0cm~15cm 土层中  $\text{NO}_3^-$  平均浓度随降雨后反硝化作用的增强.降雨期间  $\text{NO}_3^-$  的淋失和作物生长后期对  $\text{NO}_3^-$  的大量吸收而迅速降低,也反映出土壤随施肥、翻耕(将淋至深层土壤的  $\text{NO}_3^-$  翻至土表)和高温低湿期间硝化作用产生  $\text{NO}_3^-$  而重新积聚  $\text{NO}_3^-$  (如图 1d所示,以玉米-油菜轮作田为例).图 1e显示模型计算的土壤湿度(WFPS<sup>[7]</sup>,土壤含水孔隙率)与田间测量也具相似的数值和季节变化模式,均反映出雨晴交替、降雨量和降雨频度变化对土壤湿度的影响.需指出的是由于土壤  $\text{N}_2\text{O}$  释放通量具广泛的时空变化和田间通量测量的复杂性,目前还无法对 DNDC等生物地球化学模型进行绝对的验证.模型计算与田间测量在  $\text{N}_2\text{O}$  释放峰出现的时间、峰值、季节变化模式和释放量,及土壤  $\text{NO}_3^-$  含量和 WFPS 季节变化上的较好拟合结果,为应用 DNDC模型计算贵州省农业土壤  $\text{N}_2\text{O}$  释放量提供了一定依据.

### 2.2 应用 DNDC模型估算贵州省农业土壤 1995年 $\text{N}_2\text{O}$ 释放量

(1) DNDC模型输入数据来源 全省按政区划分为 80个县级  $\text{N}_2\text{O}$  释放量统计单位,每一统计单位据土壤 pH值和有机质含量划分为

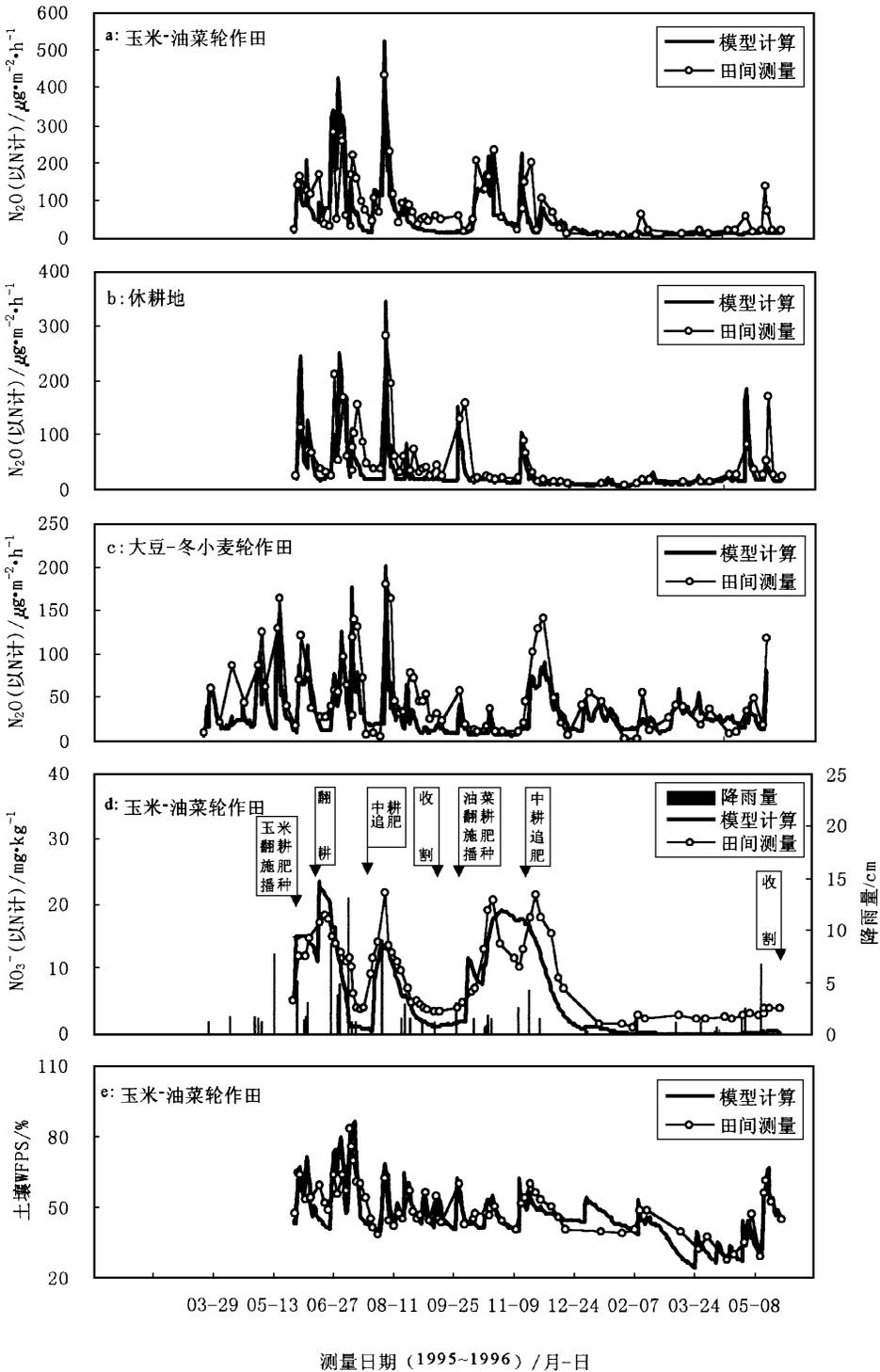


图 1 模型计算与田间测量在  $N_2O$  释放通量及  $NO_3^-$  含量和土壤湿度季节变化上的对比

若干个计算单元, 据此收集 DNDC 模型的输入参数和进行释放量计算.

粘粒含量、土壤容重、pH 值、土壤表层土初始总有机碳含量等)均来自历时 12a 的全省第 2

次土壤普查资料<sup>[12]</sup>. 因全省灌溉能力很低, 不

考虑灌溉对全省旱田  $N_2O$  释放量的影响. 1995 年中稻、玉米、冬小麦、大豆、薯类、油菜、烟叶、蔬菜和甘蔗的播种面积及休耕地的面积约占全省作物总播种面积的 98%, 其它作物播种面积所占比例不到 2%, 为简化释放量计算过程, 不考虑小面积作物的  $N_2O$  释放量. 全省 80 个县级统计单位的主要作物播种面积主要来自贵州省农业厅土肥站提供的统计数据.

在全省  $N_2O$  释放量计算过程中, 设定每一统计单位内, 同一作物的播种和收割日期、收割后秸秆归田比例、氮肥和有机肥的施用次数、施用量、施用方式和施用日期及有机肥的碳氮比、翻耕次数、翻耕方式和日期, 以及在作物轮作制度上均相同. 各统计单位作物主要轮作方式、播种和收割日期数据来自文献 [13~15], 各作物氮肥和有机肥施用数据来自贵州省农科院土肥所统计资料和文献 [13, 16]. 有机肥中的有机碳含量和碳氮比按一般堆肥计算. 省内各作物的翻耕数据根据贵州省农科院土肥所提供的统计资料.

(2) 全省 1995 年  $N_2O$  释放通量 1995 年全省各县市农业土壤  $N_2O$  释放通量 (以  $N_2O$  中的 N 计, 下同) 变化范围在  $1.0 \sim 2.5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  之间 (图 2), 其中 95% 的县市处于  $1.0 \sim 2.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  之间, 只有 5% 的县市大于  $2.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ . 全省平均  $N_2O$  释放通量约  $1.43 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 远低于近纬度的美国佛罗里达州  $N_2O$  释放通量 ( $10 \text{ kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )<sup>[9, 10]</sup>, 这与后者较高的施肥量和土壤中含有丰富的有机质有关.

由于境内各县市在年降雨量、土壤性状、土地利用和耕作制度上未存在显著差异, 因此全省  $N_2O$  释放通量的空间分布与气温变化密切相关, 表现为年均气温最高的西南部地区释放通量最高, 而年均气温最低的西北部高寒山区最低, 后者年均气温约比前者低  $7^\circ\text{C}$ .

全省各旱作生长期平均  $N_2O$  释放通量在  $18.15 \sim 25.9 \text{ g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$  之间, 夏收和秋收旱作 (如玉米和烟叶) 的平均释放通量约是越冬作物 (如小麦、油菜) 和冬闲休耕的 1.5~3.6 倍.

全省夏半年 (5~10 月) 降雨量最为集中, 占年总降雨量的 73% 以上, 6~8 月尤以突出, 多达 40% 以上; 冬半年 (11 月~次年 4 月) 仅占 15%~30%. 雨热同步变化是造成夏收和秋收作物  $N_2O$  释放通量显著高于越冬作物的主要原因.

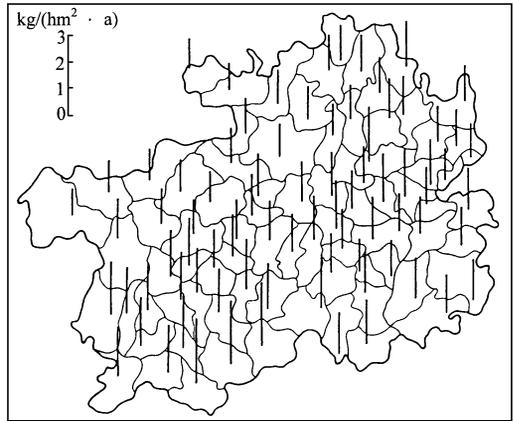


图 2 全省各县市 1995 年  $N_2O$  释放通量  
(以  $N_2O$  中的 N 计)

(3) 全省 1995 年  $N_2O$  释放量 1995 年全省农业土壤  $N_2O$  释放量 (以  $N_2O$  中的 N 计, 下同) 约  $4.38 \times 10^6 \text{ kg}$ , 即  $0.00437 \text{ Tg}$  ( $1 \text{ Tg} = 1 \times 10^{12} \text{ g}$ ), 该释放量约是近纬度美国佛罗里达州农业土壤  $N_2O$  释放量<sup>[9, 10]</sup> 的 1/6.

各县市 N 释放量变化范围在  $0.00349 \times 10^6 \sim 0.218 \times 10^6 \text{ kg}$  之间 (图 3), 变化幅度达 6250%, 西部地区释放量明显高于东部. 由于全省 95% 的县市  $N_2O$  释放通量处于  $1.0 \sim 2.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  之间, 变化幅度不大, 因此释放量的空间差异主要与各县市的作物播种面积有关, 全省旱作主要分布在西部, 而水田主要分布在东部, 水稻生长期水田  $N_2O$  净释放通量接近于零. 释放量占前 8 位的县市合计占全省 80 个县市释放总量的 30%; 而释放量处于末 8 位的县市仅占全部释放总量的 2%.

全省各作物  $N_2O$  释放量取决于各自的生长持续时间、播种面积和释放通量. 玉米、小麦、薯类、烟叶和油菜这 5 种作物的  $N_2O$  释放量合计占全部作物释放量的 86%. 其中以玉米的释放量最高, 约  $1.38 \times 10^6 \text{ kg}$ , 占全省所有作物释放量的 31.7%.

上述贵州省农业土壤  $N_2O$  释放量的空间分布和各作物的相对贡献率表明,少数几个县的  $N_2O$  释放量占了全省释放总量的 1/3; 全省释放的  $N_2O$  中有 1/3 是来自玉米地的排放,因此减少该地区农业土壤  $N_2O$  释放量的措施应集中于降低玉米地和高释放量地区的  $N_2O$  释放,进行全省范围内的普遍减排既无必要也可收效甚微。

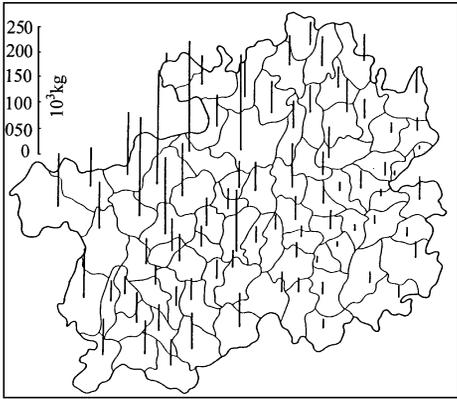


图 3 全省农业土壤  $N_2O$  释放量空间分布图

**2.3 农业活动对全省土壤  $N_2O$  释放量的影响**  
模型检验结果表明,农业活动的总体效应使全省当年  $N_2O$  释放量增加了  $2.84 \times 10^6$  kg,即农业土壤“背景  $N_2O$  释放量”约  $1.54 \times 10^6$  kg,农业活动对全省农业土壤的释放量贡献约 65%。农业活动包括作物种植、施肥和翻耕等。它们对土壤  $N_2O$  释放量的影响并不是简单的机械叠加,而是有机的组合。农业活动中施用有机肥对全省释放量影响最大,施用有机肥,使全省当年  $N_2O$  释放量增加了 55%。除有机肥外,氮肥和翻耕对全省释放量的影响程度相近,施氮肥和翻耕土壤分别使全省释放量增加了 37% 和 33%。施用氮肥并不是人类活动引起农业土壤  $N_2O$  释放量增强的唯一因素。

未来精细农业的发展,通过合理控制有机肥和氮肥施用量,调控施肥深度和翻耕次数,可使肥料、灌溉和翻耕等产生最大的田间效益,使作物产量和农业土壤引发的环境效应处于最优

平衡状态,以减少农业土壤的痕量温室气体排放量。

#### 参考文献

- 1 王少彬,宋文质,苏维瀚等.冬小麦田氧化亚氮的排放.见:王庚辰,温玉璞编.温室气体浓度和排放监测及相关过程.北京:环境科学出版社,1996.339~342.
- 2 曾江海,王智平,张玉铭等.小麦-玉米轮作期土壤排放  $N_2O$  通量及其总量估算.环境科学,1995,16(1):32~35.
- 3 黄国宏,陈冠雄,黄斌等.东北旱田生态系统  $N_2O$  排放通量测定及总量估算.则:王庚辰,温玉璞编.温室气体浓度和排放监测及相关过程.北京:环境科学出版社,1996.351~357.
- 4 郑循华,王明星,王跃思等.温度对农田  $N_2O$  产生与排放的影响.环境科学,1997,18(5):1~5.
- 5 陈冠雄,黄斌,黄国宏等.稻田  $N_2O$  和  $CH_4$  通量测定及总量估算.见:王庚辰,温玉璞编.温室气体浓度和排放监测及相关过程.北京:环境科学出版社,1996.343~350.
- 6 徐华,邢光熹,张汉辉等.太湖地区水田土壤  $N_2O$  排放通量及其影响因素.土壤学报,1995,32(增刊):144~149.
- 7 Li C S, Frolking S and Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events I. Model structure and sensitivity. Journal of Geophysical Research, 1992a, 97(D9): 9759~9776.
- 8 Li C S, Frolking S and Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events II. Model application. Journal of Geophysical Research, 1992b, 97(D9): 9777~9783.
- 9 Li C S, Frolking S E, Harriss R C et al. Modeling nitrous oxide emissions from agriculture: A Florida case study. Chemosphere, 1994b, 28(7): 1401~1415.
- 10 Li C S, Namayan V and Harris R C. Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(2): 297~306.
- 11 徐文彬,洪业汤,陈旭晖.贵州省旱田土壤  $N_2O$  释放及其环境影响因素.环境科学,2000,21(1):7~11.
- 12 贵州省土壤普查办公室.贵州省土壤.贵阳:贵州科技出版社,1994.1~600.
- 13 贵州省种植业区划编写组.贵州省种植业区划.贵阳:贵州人民出版社,1989.1~534.
- 14 崔读昌,刘洪顺,闵瑾如等.中国主要农作物气候资源图集.北京:气象出版社,1984.1~223.
- 15 陈旭晖.中国贵州山区综合农业发展研究.贵阳:贵州科技出版社,1994.20~115.
- 16 李笃仁,黄照恩.实用土壤肥料手册.北京:中国农业科技出版社,1989.4~225.