

太行山前平原夏玉米-冬小麦轮作生态系统碳截存及其气体调节价值

王玉英, 胡春胜, 程一松, 张玉铭, 明 华, 杨培培

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021)

摘 要:应用静态明箱-气相色谱法对 4 个施氮肥水平 N0(0 kg N·hm⁻²), N200(200 kg N·hm⁻²), N400(400 kg N·hm⁻²), N600(600 kg N·hm⁻²) 的夏玉米-冬小麦季 CH₄、N₂O 排放进行了研究, 同时估算了其年季净固碳量及其 O₂ 气体调节价值, 计算了年综合气体调节价值。结果表明, 夏玉米-冬小麦农田生态系统为 CH₄ 吸收汇和 N₂O 排放源, 随着氮肥施入量的增加, 其对 CH₄ 吸收能力减弱, 其 N₂O 排放量增加。夏玉米季 N400 和 N600 的 CH₄ 平均排放速率显著高于 N0 和 N200 ($P<0.05$); 冬小麦季 N0 处理 CH₄ 平均排放速率显著低于 N600 处理 ($P<0.05$), 冬小麦季 N600 的 N₂O 平均排放速率显著高于 N0 处理 ($P<0.05$)。夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N0、N200、N400 和 N600 处理 CH₄ 排放总量分别为 -2.55、-1.99、-0.94 和 -0.47 kg·hm⁻²·a⁻¹; 其 N₂O 排放总量分别为 1.05、1.45、1.67 和 2.22 kg·hm⁻²·a⁻¹。随着氮肥施用量的增加, 夏玉米季和冬小麦季转化为 NPP 的碳量和净固碳量均增加; 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N0、N200、N400 和 N600 处理年季净固碳量分别为 6 224.29、13 885.05、14 554.35 和 14 521.10 kg·hm⁻²·a⁻¹; 其中 N200、N400 和 N600 分别比 N0 处理增加了 123.08%、133.83% 和 133.30%。夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N0、N200、N400 和 N600 处理综合气体调节价值分别为 10 560.19、23 602.64、24 727.78 和 24 634.24 yuan·hm⁻²·a⁻¹; N200、N400 和 N600 分别比 N0 处理增加了 123.51%、134.16% 和 133.27%, 以 N400 处理年固碳量最高。

关键词:太行山前平原; 夏玉米-冬小麦轮作生态系统; 碳截存; 气体调节价值

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1508-08

Carbon Sequestrations and Gas Regulations in Summer-Maize and Winter-Wheat Rotation Ecosystem Affected by Nitrogen Fertilization in the Piedmont Plain of Taihang Mountains, China

WANG Yu-ying, HU Chun-sheng, CHENG Yi-song, ZHANG Yu-ming, MING Hua, YANG Pei-pei

(Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Nitrous oxide and methane emissions from a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat were studied by static transparent chamber and gas chromatography technique from July in 2007 to June in 2008. The nitrogen fertilizer application rates were 0 (N0), 200 (N200), 400 (N400) and 600 kg N·hm⁻² (N600), respectively. Simultaneously, the net carbon sequestration, the O₂ emission quantity and the economic values of gas regulations per year were calculated. The results showed; summer-maize and winter-wheat cropland ecosystems were the sink of CH₄ and source of N₂O, respectively. With the increase of nitrogen application, the CH₄ consumption decreased and the N₂O emission increased. The CH₄ average flux rates of N400 and N600 were greater than those of N0 and N200 during the summer-maize growth period ($P<0.05$). During the winter-wheat growth period, the CH₄ and N₂O average flux rates of N0 all decreased significantly compared with that of N600 ($P<0.05$). The cumulative CH₄ emissions in treatments N0, N200, N400 and N600 were -2.55, -1.99, -0.94 and -0.47 kg·hm⁻²·a⁻¹, respectively; And their cumulative N₂O emissions were 1.05, 1.45, 1.67 and 2.22 kg·hm⁻²·a⁻¹, respectively. With increase of nitrogen application, the carbon content of NPP (net primary productivity) and the net carbon sequestration all increased in summer-maize and winter-wheat rotation ecosystem. The net carbon sequestration quantities per year of N0, N200, N400 and N600 were 6 224.29, 13 885.05, 14 554.35 and

收稿日期: 2008-10-20

基金项目: 知识创新工程项目 (KZCX2-W-432-01); 知识创新工程重要方向项目 (0602095202); 国家科技支撑项目 (2007BAD87B04-03 和 2006BAD17B05)

作者简介: 王玉英 (1977—), 女, 河北唐山人, 博士, 主要从事农田生态系统碳循环研究。E-mail: wangyy620@msn.com

通讯作者: 胡春胜 E-mail: cshu@sjziam.ac.cn

14 521.10 kg·hm⁻²·a⁻¹, respectively; And the net carbon sequestrations per year of N200, N400 and N600 increased 123.08%, 133.83% and 133.30% compared with that of N0, respectively. The economic values of integrated gas regulations per year of N0, N200, N400 and N600 were 10 560.2, 23 602.6, 24 727.8 and 24 634.2 yuan·hm⁻²·a⁻¹, respectively; and compared with the corresponding values of N0, the economic values of integrated gas regulations of N200, N400 and N600 increased 123.51%, 134.16% and 133.27%, respectively.

Keywords: the piedmont plain of Taihang Mountains; summer-maize and winter-wheat rotation ecosystem; carbon sequestration; economic values of gas regulations

农田作为陆地的主要组成部分,农田生态系统碳平衡与碳动态对于理解和阐明其在全球碳平衡中的贡献具有重要作用。近年来由于化学肥料施入和人工灌溉等管理措施,使农田碳平衡与碳动态具有很大的不确定性,大量氮肥施用可能影响从土壤释放到大气中的碳量和植株以净第一生产力(NPP)截存的有机碳量(carbon sequestration)。目前关于碳截存的研究多见于热带、温带和高寒草原^[1],而农田尤其是我国北方玉米-小麦轮作农田生态系统的研究资料相对缺乏。生态系统气体调节功能包括大气调节和气候调节,主要指调节 CO₂/O₂ 平衡、O₃ 对臭氧层的保护、SO_x 水平以及温室气体调节等^[2-3]。农田生态系统通过光合作用产物将太阳能转换为生物能,在此过程中固定 CO₂、释放 O₂,同时由于近年来化学肥料的大量施用,农田生态系统向大气环境排放的温室气体(如 CH₄、CO₂ 和 N₂O 等)迅速增加。目前人们对农田生态系统温室气体排放进行了全面深入的研究^[4-7],许多学者也对我国森林、草地等生态系统的气体调节功能及其价值进行了估算^[8-10],但当前对农田尤其是我国北方农田生态系统服务功能价值评估的报道很少,而且目前生态系统服务功能价值评估一般在较大尺度上进行(如国家、流域、城市、农场等),在这些尺度上难以研究生态系统服务功能形成机制及其变化过程,而微观研究能弥补这些不足^[11]。目前关于太行山前平原农田生态系统气体调节功能及其价值的研究极少,而建立在大田实验基础上的研究更是鲜有报道。

鉴于此,我们采用静态箱-气相色谱法原位观测不同施氮量下太行山前平原夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统温室气体排放通量;同时结合生物量观测,运用造林成本法、工业制氧法和碳税法估算其生态系统服务功能和价值。探讨不同施氮量对农田生态系统碳截存及气体调节功能的影响,以期为宏观尺度研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于 2007 年 7 月到 2008 年 6 月在中国科学

院栾城农业生态系统试验站进行。栾城站位于北纬 37°50',东经 114°40',海拔高度 50.10 m。属中国东部暖温带半湿润季风气候,年平均气温 12.20 ℃,降雨量 536.80 mm,无霜期 200 d 左右。本区供试土壤为潮褐土,0~20 cm 为中性壤土,其土壤理化性状分别为:有机质 1.51 g·kg⁻¹;全氮 0.10 g·kg⁻¹,有效磷 9.33 mg·kg⁻¹,有效钾 95.60 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验在夏玉米-冬小麦轮作长期定位实验地进行,分为 4 个施氮水平(见表 1),1/4 氮肥和全部磷肥在小麦季作为底肥,1/4 氮肥在小麦季作为追肥施入,1/2 氮肥在玉米季追肥施入。每个处理 3 个重复,每个重复的试验小区面积为 5 m×6 m。

表 1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理	N0	N200	N400	N600
N/kg·hm ⁻²	0	200	400	600
P ₂ O ₅ /kg·hm ⁻²	0	65	65	65

1.3 气体样品的采集与分析

采用静态箱-气相色谱法(static chamber/gas-chromatography techniques)观测夏玉米-冬小麦农田生态系统温室气体排放通量。采样箱由顶箱和底座(地箱)组成,采样箱用透明的有机玻璃制成,底座用聚乙烯塑料制成。在小区中央埋设采样箱底座,地箱四面体,面积 500 mm×500 mm,深度 200 mm,上端有密封水槽。采样箱几何尺寸为 500 mm×500 mm×950 mm。采样时地箱水槽内加水密封,顶箱上端装有 2 个空气搅拌小风扇、取气体样品接口。试验观测频率为每周 1 次,时间均为上午 9:00—11:00;每个处理有 3 个重复。气温、土壤温度等环境要素与温室气体排放同期观测。其中,气温、地表温度、箱内温度和 5 cm 地温由温度表测定。扣箱后立刻采集样品,用 60 mL 注射器采集第 1 次样品,每隔 10 min 取 60 mL 气体保存,扣箱 20 min,共取 3 次。

采样后立即将样品带回实验室分析。样品采用 CA-5 气体样品进样仪进样,利用 Agilent6820 型气相

色谱仪进行分析。 CH_4 检测器为FID(氢火焰离子检测器),载气为氮气,流速是 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。氢气为燃气,流速为 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,空气为助燃气,流速为 $400\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。检测器温度为 $200\text{ }^\circ\text{C}$,分离柱温度为 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 。 N_2O 检测器为电子检测器(ECD)(电子捕获检测器),分离柱内填充料为80~100目PorapakQ,载气为氮气,流量为 $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,检测器温度为 $330\text{ }^\circ\text{C}$,分离柱温度为 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.4 气体通量计算

气体通量表示单位时间面积观测箱内该气体质量的变化。气体通量利用式(1)求得^[12]:

$$F=60/100\rho H\cdot P/1\ 103\cdot 273/(273+T)\cdot dCt/dt \quad (1)$$

式中: F 为被测气体排放通量, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下被测气体的密度, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; H 为箱高, cm ; P 为采样点的气压, bar ; T 为采样时箱内平均气温, $^\circ\text{C}$; t 是采样时间, min ; dCt/dt 为采集箱内被测气体体积混合比浓度变化率, $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

通过夏玉米-冬小麦生育期内温室气体排放的田间原位观测数据,采用内插法在实际观测值的基础上计算出不同施氮量各处理其余未观测天数当天同时刻的温室气体排放通量。其计算公式为:

$$Y=\sum_{i=1}^n X_i \times 24 (n=1, 2, 3, \dots, i) \quad (2)$$

式中: Y 为温室气体排放总量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; X_i 为温室气体排放速率, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; i 为夏玉米-冬小麦生育期总天数。

1.5 碳截存及气体调节价值计算

农田生态系统碳截存是指作物以其净第一生产力(NPP)方式固定下来的有机碳。若以差减法来粗略计算夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统碳收支,可参照公式(3)~(6)进行计算。其中系数0.68是碳水化合物对 CO_2 的转化比率($[\text{CH}_2\text{O}]/[\text{CO}_2]=0.68$);0.85是生物量对碳水化合物的转化比率($[\text{Biomass}]/[\text{CH}_2\text{O}]=0.85$),即光合产物对干物质的转化率约为0.6^[13]。华北平原夏玉米根系生物量(Root biomass)约占地上生物量(Total above ground biomass, TAGB) 0.10~0.15,冬小麦根系生物量约占地上生物量的0.15~0.20^[14],这里统一取0.15计算。因此可用公式(3)~(6)对生态系统碳收支进行估算:

$$C_{\text{CH}_4}=0.75\times Q_{\text{CH}_4} \quad (3)$$

$$\text{NPP}=1.15\times\text{TAGB} \quad (4)$$

$$C_{\text{NPP}}=0.24\times\text{NPP}/(0.68\times 0.85)=0.47\times\text{NPP} \quad (5)$$

$$\Delta C=C_{\text{NPP}}-C_{\text{CH}_4} \quad (6)$$

式中: C_{CH_4} 为以 CH_4 形式排放的总碳量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; Q_{CH_4} 为生态系统 CH_4 的季节排放总量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; NPP (Net primary production)为净初级生产力, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; TAGB (Total above ground biomass)为地上部总生物量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; C_{NPP} 为植株转化为NPP的碳量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; ΔC 表示夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统对大气中碳的净固定量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

农田生态系统气体调节功能包括产生环境正效应的 O_2 释放、 CO_2 吸收和产生环境负效应 CH_4 、 N_2O 等温室气体排放。本研究根据目前常用的造林成本法、工业制氧法和碳税法计算夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统气体调节价值^[11]。根据IPCC的报告^[15],以100 a时间尺度计,1 kg CH_4 的增温效应是1 kg CO_2 的21倍,而1 kg N_2O 的增温效应是1 kg CO_2 的310倍,用全球增温潜势(Global warming potential, GWP)来表示。根据百年尺度增温潜势可以将 CH_4 和 N_2O 换算为 CO_2 ,计算其气体调节价值^[11]:

$$E_c=0.27\times\alpha_{\text{GWP}}\times E \quad (7)$$

$$V_c=\frac{1}{2}(C_{f-\text{CO}_2}+C_i)\times E_c \quad (8)$$

式中: E_c 根据增温潜势将 CH_4 或者 N_2O 换算为纯碳的量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; α_{GWP} 为不同气体增温潜势; E 为温室气体排放总量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $C_{f-\text{CO}_2}$ 为固定 CO_2 的造林成本,目前较多采用的造林成本为 $0.26\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_i 为排放 CO_2 的碳税,目前较多采用 $1.25\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$; V_c 为气体调节价值, $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

利用样方收获法在成熟期测定生物量,根据光合作用方程植物合成162 g 多糖有机物质,可释放192 g O_2 ,即植物每积累1 g 干物质,可以释放1.19 g O_2 ,由此可反推出生态系统释放的 O_2 的量及其价值^[11]:

$$V_{\text{O}_2}=\frac{1}{2}(C_{f-\text{O}_2}+C_p)\times 1.19\times M_{\text{NPP}} \quad (9)$$

式中: M_{NPP} 为农田生态系统单位面积生产的干物质质量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; $C_{f-\text{O}_2}$ 为释放单位质量 O_2 的造林成本,目前较多采用 $0.35\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_p 为工业制氧成本,较多采用 $0.40\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$; V_{O_2} 为农田生态系统释放 O_2 的价值, $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.6 数据处理

应用方差分析(ANOVA)、回归分析(Regression analysis)相关分析对数据进行处理,处理间差异的多重比较采用Least-significant difference(LSD)法完成。所有数据分析均在Microsoft Excel 2003 和 SPSS13.0 环境下进行。

2 结果与分析

2.1 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 CH₄ 季节排放模式

夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 CH₄ 季节排放模式见图 1。由图可见,夏玉米季 N0 和 N200 处理的 CH₄ 排放速率为负值,表现 CH₄ 的吸收汇,其吸收量的最高值出现在 2007 年 8 月 15 日 N0 处理,其数值为 $-0.1182 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; N400 和 N600 处理 CH₄ 排放速率为正值,表现为 CH₄ 的排放源,其排放量的最高值出现在 2007 年 9 月 2 日 N400 处理,其数值为 $0.052 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 且随着氮肥施入量的增加,CH₄ 排放速率呈上升趋势。冬小麦季各个处理均表现为 CH₄ 的吸收汇,这与前人研究结果相吻合^[16-17]。由图可见,随着氮肥施用量的增加,冬小麦田对 CH₄ 的吸收量降低; CH₄ 吸收量的最大值出现在 2008 年 3 月 26 日 N400 处理,其数值为 $-0.090 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由图可见冬小麦田 CH₄ 存在两个吸收峰,第 1 个峰值出现在 11 月 27 日前后,最大吸收值为 N200 处理的 $-0.075 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,此时小麦处于入冬前的短暂生长期,无明显降水(见图 2),土壤底墒低,干燥透气的土壤环境有利于 CH₄ 氧化菌发挥活性,土壤表现出吸收 CH₄ 的特性^[17]。第 2 个峰值出现在 3 月 26 日前后的小麦开花期,此时通量变化对水分和温度的响应很敏感。2008 年 3 月 20 日之后降水量和 5 cm 土壤温度均明显增加(见图 2),夏季增加的降水和地温使较短时间

内土壤含水量及温度均有所提高,进而达到土壤氧化 CH₄ 的最适条件,从而加大了土壤对 CH₄ 的吸收;同时,雨水中的溶解氧也在一定程度上促进了土壤对 CH₄ 的吸收和氧化^[18]。

2.2 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N₂O 季节排放模式

夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N₂O 季节排放模式见图 3。由图可见,夏玉米季 N₂O 排放值在 $0.003 \sim 0.067 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间,表现为 N₂O 排放源其最大吸收值出现在 2007 年 9 月 2 日 N400 处理,数值为 $0.067 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。冬小麦季 N₂O 排放速率为正值,表现为排放源。随着氮肥施入量的增加, N₂O 排放速率呈上升趋势,这与其他人的研究成果相吻合^[19-20]。冬小麦季的 N₂O 排放存在着两个明显的排放峰,分别出现在 2007 年 11 月 27 日前后和 2008 年 3 月 26 日前后,其最大值均出现在 N600 处理中,分别为 0.048 和 $0.068 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这两个排放高峰均与氮肥施入有关,第 1 个排放峰出现在冬小麦施底肥播种后不久,此时小麦处于入冬前的短暂生长期,在 11 月 29 日之前 5 cm 土壤温度均在 0℃ 以上,其平均值为 3.7℃ (见图 2),土壤微生物活动处于入冬前的活跃期,进而导致土壤生成和排放的 N₂O 增加。第 2 个排放峰在小麦春季追肥后出现,施肥为植株提供了生长所需养分,同时也为微生物提供了充足的底物,此时 5 cm 土壤温度在 10℃ 以上,降水量明显增加(见图 2),土壤干湿交替状态使土壤硝化和反硝化过程增强,导致土

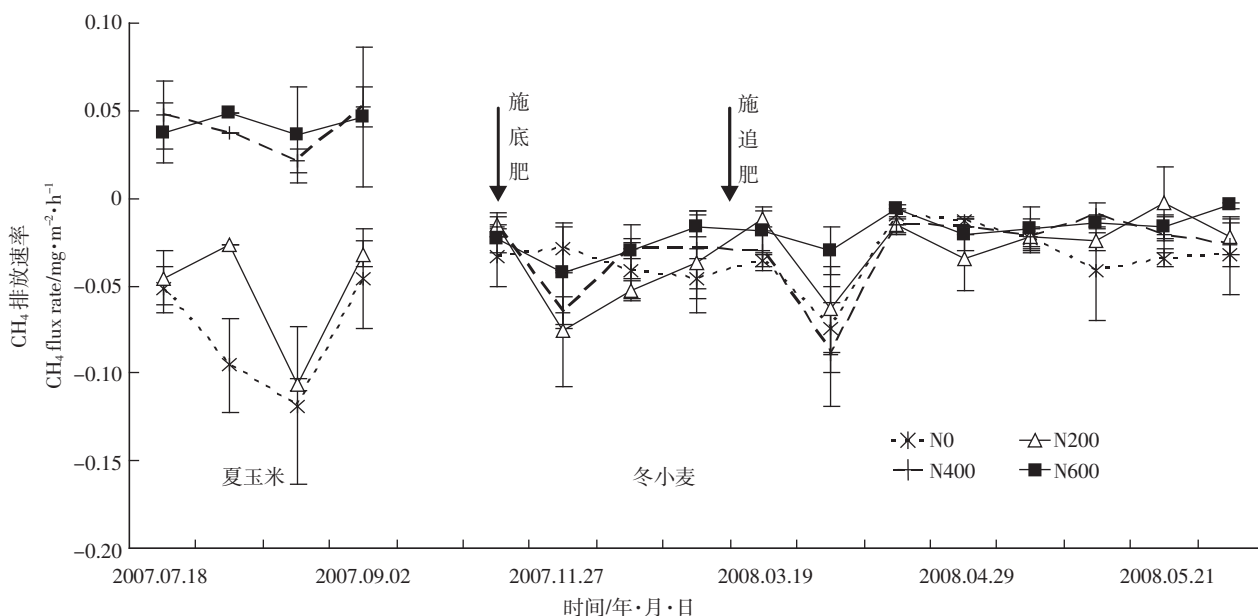


图 1 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 CH₄ 季节排放模式

Figure 1 Seasonal CH₄ flux from a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat

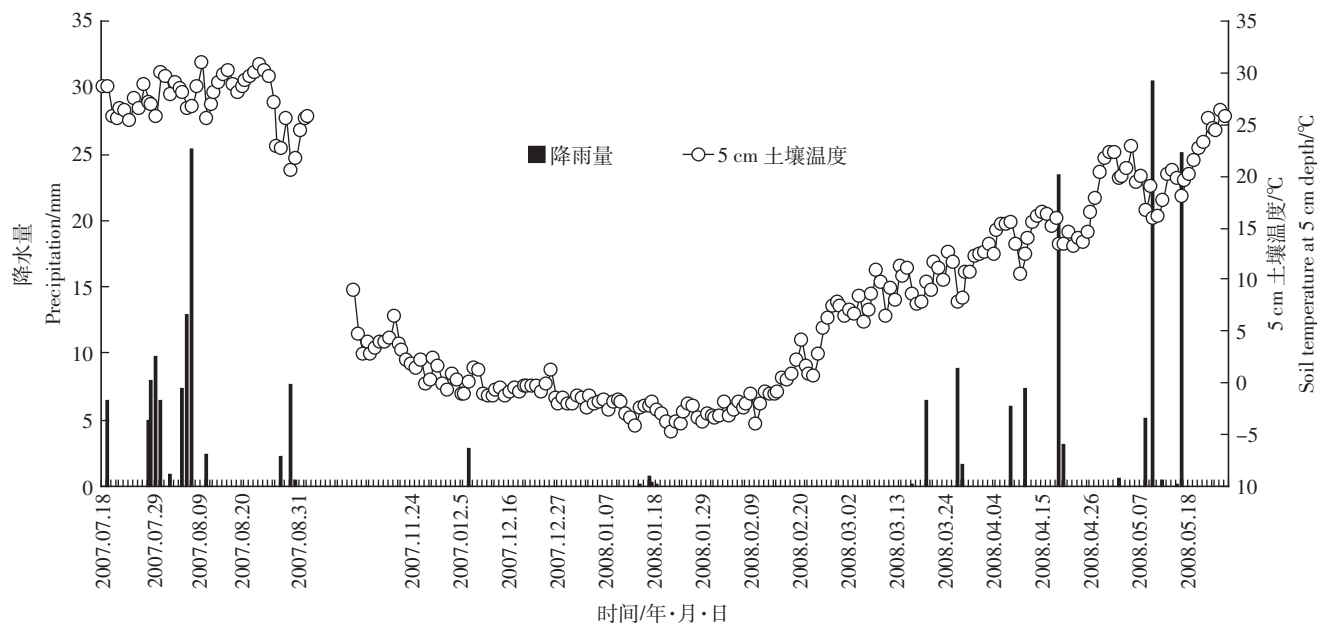
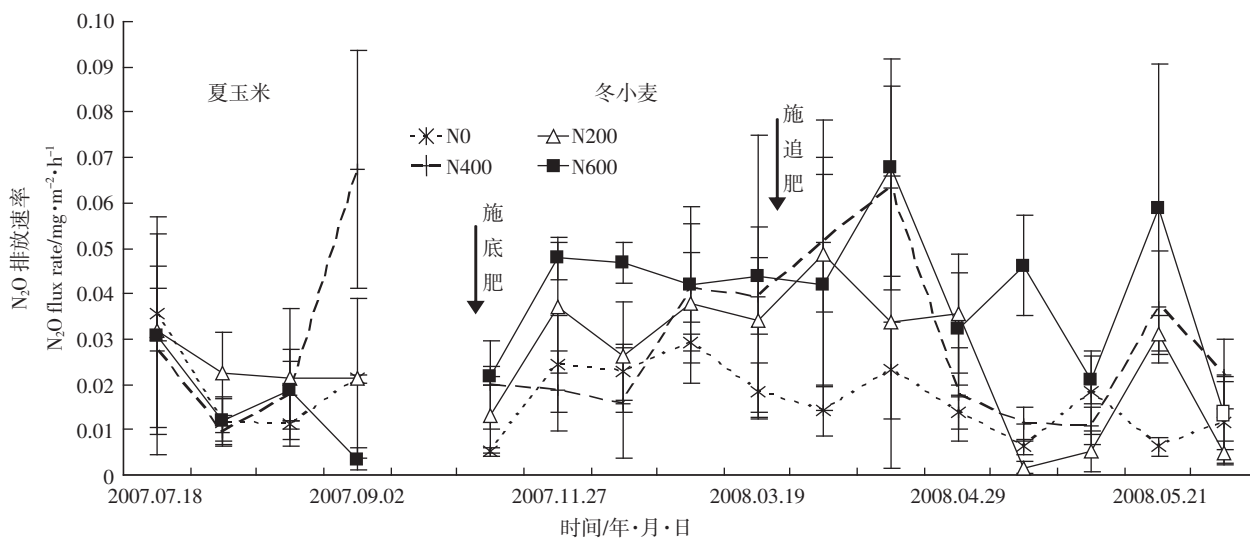


图2 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 5 cm 土壤温度及降水量季节变化

Figure 2 Soil temperature at 5 cm depth and precipitation from a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat

图3 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N_2O 季节排放模式Figure 3 Seasonal N_2O flux from a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat

壤生成和排放的 N_2O 增多^[20]。

2.3 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 CH_4 、 N_2O 平均排放速率与季节排放总量

夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 CH_4 、 N_2O 平均排放速率与季节排放总量见表2。结果表明,夏玉米季的 CH_4 平均排放速率随着氮肥施用量的增加而增加,N400 和 N600 处理的 CH_4 平均排放速率显著高于 N0 和 N200 ($P<0.05$); N0、N200、N400 和 N600 处理夏玉米季 CH_4 排放总量分别为 -0.88 、 -0.59 、 0.45 和 $0.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。夏玉米季 N_2O 平均排放速率处

理间差异不显著,其 N0、N200、N400 和 N600 处理 N_2O 排放总量分别为 0.26 、 0.32 、 0.28 和 $0.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

冬小麦季 CH_4 平均排放速率均为负值,随着氮肥施用量的增加冬小麦田对 CH_4 的吸收量降低,其中 N0 处理的 CH_4 平均排放速率显著低于 N600 处理 ($P<0.05$)。冬小麦季 N0、N200、N400 和 N600 处理 CH_4 排放总量分别为 -1.67 、 -1.40 、 -1.39 和 $-0.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施氮量增加减低冬小麦田对 CH_4 的吸收主要是因为 NH_4^+ 对土壤 CH_4 的氧化有很强的抑制作用^[21-22],施入氮肥的土壤中 NH_4^+ 富集程度高^[23-24]。张铭钰等^[25]在栾

表 2 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 CH₄、N₂O 平均排放速率与季节排放总量Table 2 The average flux rates and total emission quantities of CH₄ and N₂O from a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat

处理		CH ₄ 排放速率/mg·m ⁻² ·h ⁻¹	CH ₄ 排放总量/kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放速率/mg·m ⁻² ·h ⁻¹	N ₂ O 排放总量/kg·hm ⁻²
玉米	N0	-0.08(0.010)b	-0.88	0.02(0.008)a	0.26
	N200	-0.06(0.017)b	-0.59	0.03(0.015)a	0.32
	N400	0.04(0.016)a	0.45	0.03(0.024)a	0.28
	N600	0.04(0.013)a	0.48	0.02(0.012)a	0.18
小麦	N0	-0.04(0.003)b	-1.67	0.02(0.003)b	0.78
	N200	-0.03(0.005)ab	-1.40	0.02(0.009)ab	1.14
	N400	-0.03(0.003)ab	-1.39	0.03(0.002)ab	1.39
	N600	-0.02(0.001)a	-0.95	0.04(0.011)a	2.04

注:括号内的数值为标准误差,不同小写字母表示 LSD 多重比较差异显著($P<0.05$)。

城站的研究表明,施氮土壤的 NH₄⁺-N 浓度远高于不施氮土壤,且在相同施氮水平下冬小麦季氨挥发通量明显低于玉米季,说明冬小麦季耕层土壤 NH₄⁺-N 在施肥后深翻等措施下很快被转化为了 NO₃⁻-N。土壤中 NO₃⁻-N 聚集会影响甲烷氧化菌的渗透势^[24],进而抑制土壤对 CH₄ 氧化,造成其对 CH₄ 吸收量的降低。

随着氮肥施用量的增加,冬小麦季 N₂O 平均排放速率和排放总量呈上升趋势。N600 的 N₂O 平均排放速率显著高于 N0 处理($P<0.05$)。冬小麦季 N0、N200、N400 和 N600 处理 N₂O 排放总量分别为 0.78、1.14、1.39 和 2.04 kg·hm⁻²。上述研究表明有效控制氮源可减少土壤 N₂O 排放。这可能是因为在无外源氮施入情况下,土壤中的有效氮被植物利用后,使硝化或者反硝化作用失去有效氮源,从而减少 N₂O 的产生机会^[26]。因此,氮源成为 N₂O 排放的主要限制因子,土壤中存在多余的有效氮是土壤 N₂O 产生的前提条件^[27],使得在 N200、N400 和 N600 水平下土壤 N₂O 排放出现差异。

2.4 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统碳截存

人类通过对农田生态系统施用化学肥料和人工灌溉等措施,促进其净第一性生产力(NPP)来截存一定数量的有机碳,在一定程度上可缓解大气 CO₂ 浓度

升高,部分解释“漏失汇”(missing sink)^[28]。夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统碳截存见表 3。结果表明,夏玉米季随着氮肥施用量的增加转化为 NPP 的碳量和净固碳量均增加,N0、N200、N400 和 N600 处理夏玉米季净固碳量分别为 2 458.58、6 022.06、6 096.25 和 6 931.12 kg·hm⁻²。冬小麦季转化为 NPP 的碳量和净固碳量均以 N400 处理最高;N0、N200、N400 和 N600 处理的净固碳量分别为 3 765.71、7 862.99、8 458.10 和 7 589.98 kg·hm⁻²。

2.5 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统气体调节功能及其价值

农田生态系统气体排放一方面对人类产生积极作用(固定 CO₂ 和排放 O₂);另一方面排放对人类有消极作用的温室气体(CH₄、N₂O 等),导致温室效应。因此农田生态系统服务功能存在正负效应,对应的生态系统服务价值也就有正负之分。本研究中夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统气体调节功能及其价值见表 4。结果表明,夏玉米季氧气的气体调节价值和综合气体调节价值均随着氮肥施入量的增加而增加。N0、N200、N400 和 N600 处理夏玉米季排放氧气的气体调节价值分别为 2 342.74、5 739.44、5 810.90

表 3 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统碳截存(kg·hm⁻²)Table 3 The carbon sequestration from a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat(kg·hm⁻²)

处理	CH ₄ 含碳量 CH ₄ -C	地上生物量 TAGB	净初级生产力 NPP	转化为 NPP 的碳量 C _{NPP}	净固碳量 ΔC	
玉米	N0	-0.66	4 547.48	5 229.61	2 457.92	2 458.58
	N200	-0.44	11 140.83	12 811.95	6 021.62	6 022.06
	N400	0.33	11 279.53	12 971.46	6 096.58	6 096.25
	N600	0.36	12 824.19	14 747.82	6 931.47	6 931.12
小麦	N0	-1.25	6 964.79	8 009.51	3 764.47	3 765.71
	N200	-1.05	14 545.69	16 727.54	7 861.95	7 862.99
	N400	-1.04	15 646.73	17 993.74	8 457.06	8 458.10
	N600	-0.72	14 041.19	16 147.37	7 589.26	7 589.98

表 4 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统气体调节功能及其价值

Table 4 The gas regulation functions and values from a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat

处理		纯碳含量/kg·hm ⁻²			温室气体调节价值/yuan·hm ⁻² ·a ⁻¹			氧气的气体调节价值/ yuan·hm ⁻² ·a ⁻¹	综合气体调节价值/ yuan·hm ⁻² ·a ⁻¹
		固定 C	排放 CH ₄	排放 N ₂ O	固定 C	排放 CH ₄	排放 N ₂ O		
玉米	N0	2 457.92	-5.05	22.29	1 850.69	-3.80	16.79	2 342.74	4 180.44
	N200	6 021.62	-3.39	26.79	4 533.98	-2.55	20.17	5 739.44	10 255.80
	N400	6 096.58	2.55	23.97	4 590.42	1.92	17.84	5 810.90	10 381.56
	N600	6 931.47	2.73	15.09	5 219.05	2.05	11.37	6 606.66	11 812.30
小麦	N0	3 764.47	-9.54	66.34	2 834.46	-7.18	49.95	3 588.06	6 379.75
	N200	7 861.95	-7.99	96.10	5 919.65	-6.02	72.35	7 493.53	13 346.85
	N400	8 457.06	-7.96	117.23	6 367.74	-6.00	88.27	8 060.76	14 346.22
	N600	7 589.26	-5.47	172.83	5 714.34	-4.12	130.13	7 233.63	12 821.95

和 6 606.66 yuan·hm⁻²·a⁻¹; 其综合气体调节价值分别为 4 180.44、10 255.80、10 381.56 和 11 812.30 yuan·hm⁻²·a⁻¹。冬小麦季氧气的气体调节价值和综合气体调节价值随施氮量增加而增加, 均以 N400 处理最高。N0、N200、N400 和 N600 处理冬小麦季排放氧气的气体调节价值分别为 3 588.06、7 493.53、8 060.76 和 7 233.63 yuan·hm⁻²·a⁻¹; 其综合气体调节价值分别为 6 379.75、13 346.85、14 346.22 和 12 821.95 yuan·hm⁻²·a⁻¹。

3 结论

(1) 夏玉米季 N400 和 N600 CH₄ 平均排放速率显著高于 N0 和 N200 ($P<0.05$), N₂O 平均排放速率处理间差异不显著。冬小麦季各处理 CH₄ 排放速率均为负值, 随着氮肥施用量的增加冬小麦田对 CH₄ 吸收量降低, N0 处理 CH₄ 平均排放速率显著低于 N600 处理 ($P<0.05$); 冬小麦季 N₂O 平均排放速率随着氮肥施用量的增加而增加, 其中 N600 显著高于 N0 处理 ($P<0.05$)。

(2) 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统为 CH₄ 吸收汇和 N₂O 排放源。随着氮肥施入量的增加, 其对 CH₄ 吸收能力减弱, 其 N₂O 排放量增加。夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N0、N200、N400 和 N600 处理 CH₄ 年季排放总量分别为 -2.55、-1.99、-0.94 和 -0.47 kg·hm⁻²·a⁻¹; 其 N₂O 年季排放总量分别为 1.05、1.45、1.67 和 2.22 kg·hm⁻²·a⁻¹。

(3) 夏玉米季随着氮肥施用量增加转化为 NPP 的碳量和净固碳量均增加, 冬小麦季转化为 NPP 的碳量和净固碳量均以 N400 处理最高。夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N0、N200、N400 和 N600 年季净固碳量分别为 6 224.29、13 885.05、14 554.35 和

14 521.10 kg·hm⁻²·a⁻¹; N200、N400 和 N600 分别比 N0 处理增加了 123.08%、133.83% 和 133.30%, 以 N400 处理年固碳量最高。

(4) 夏玉米季氧气的气体调节价值和综合气体调节价值均随着氮肥施入量的增加而增加。冬小麦季氧气的气体调节价值和综合气体调节价值均以 N400 处理最高。夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 N0、N200、N400 和 N600 处理全年综合气体调节价值分别为 10 560.19、23 602.64、24 727.78 和 24 634.24 yuan·hm⁻²·a⁻¹; N200、N400 和 N600 分别比 N0 处理增加了 123.51%、134.16% 和 133.27%, 以 N400 处理最高。

参考文献:

- [1] 闫玉春, 唐海萍, 常瑞英, 等. 长期开垦与放牧对内蒙古典型草原地下碳截存的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1388-1393.
YAN Yu-chun, TANG Hai-ping, CHANG Rui-ying, et al. Variation of below-ground carbon sequestration under long term cultivation and grazing in the typical steppe of Nei Monggol in North China[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(5): 1388-1393.
- [2] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and nature[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [3] Daily G C. Nature's service: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [4] 黄国宏, 陈冠雄, 黄 斌, 等. 玉米植株对大田温室气体 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(3): 261-264.
HUANG Guo-hong, CHEN Guan-xiong, HUANG Bin, et al. Effect of maize plant on N₂O emission from field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(3): 261-264.
- [5] 贾金生, 李 俊, 张永强. 夏玉米生长盛期农田土壤 CO₂ 排放的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 1-4.
JIA Jin-sheng, LI Jun, ZHANG Yong-qiang. Study on CO₂ emission from soil of typical farmland in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 1-4.
- [6] Zou J W, Huang Y, Zhong L G, et al. Effects of water regime and straw application in paddy rice season on N₂O emission from following wheat

- growing season[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2003, 2(1):68–74.
- [7] 张中杰, 朱波, 江长胜, 等. 川中丘陵区旱地小麦生态系统 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 排放特征[J]. 生态学杂志, 2005, 24(2):131–135.
- ZHANG Zhong-jie, ZHU Bo, JIANG Chang-sheng, et al. CO_2 , N_2O and CH_4 emission from dry-land wheat ecosystem in hilly area of central Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2):131–135.
- [8] 吴钢, 肖寒, 赵景柱, 等. 长白山森林生态系统服务功能[J]. 中国科学 C 辑, 2001, 31(5):471–480.
- WU Gang, XIAO Han, ZHAO Jing-zhu, et al. Forest ecosystem service functions in Changbai mountain[J]. *Science in China (Series C)*, 2001, 31(5):471–480.
- [9] 蒋菊生, 王如松. 橡胶林固定 CO_2 和释放 O_2 的服务功能及其价值估计[J]. 生态学报, 2002, 22(9):1545–1551.
- JIANG Ju-sheng, WANG Ru-song. Function of carbon sequestration and oxygen release of rubber plantations and its value estimation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9):1545–1551.
- [10] 谢高地, 鲁春霞, 肖玉. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J]. 山地学报, 2003, 21(1):50–55.
- XIE Gao-di, LU Chun-xia, XIAO Yu. The economic evaluation of grassland ecosystem services in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(1):50–55.
- [11] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 稻田生态系统气体调节功能及其价值[J]. 自然资源学报, 2004, 19(5):617–623.
- XIAO Yu, XIE Gao-di, LU Chun-xia, et al. The gas regulation function of rice paddy ecosystems and its value[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(5):617–623.
- [12] Shinel J P, Gullledge J. Microbial community structure and global trace gases[J]. *Global Change Biology*, 1998(4):745–758.
- [13] Passioura J B. Roots and drought resistance[J]. *Agricultural Water Management*, 1983(7):265–280.
- [14] 张喜英. 作物根系与土壤水分利用[M]. 北京:气象出版社, 1999:38, 44.
- ZHANG Xi-ying. Crop root system and soil water use[M]. Beijing:China Meteorological Publishing House, 1999:38, 44.
- [15] Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, et al. Radiative forcing climate change[M]//IPCC ed. in climate change 2001: the scientific basis (IPCC third assessment report). UK and New York, NY, USA:Cambridge University Press, 2001:212.
- [16] 齐玉春, 董云社, 章申. 华北平原典型农业区土壤甲烷通量研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(3):56–58, 60.
- QI Yu-chun, DONG Yun-she, ZHANG Shen. Methane fluxes of typical agricultural soil in the North China Plain[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(3):56–58, 60.
- [17] 张雪松, 申双和, 李俊, 等. 华北平原冬麦田土壤 CH_4 的吸收特征研究[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(2):181–188.
- ZHANG Xue-song, SHEN Shuang-he, LI Jun, et al. Soil CH_4 uptake in winter wheat field in the North China Plain[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(2):181–188.
- [18] Tom M S, Harte J. Methane consumption by montane soils: implications for positive and negative feedback with climatic change[J]. *Biogeochemistry*, 1996, 32(1):53–67.
- [19] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤质地对小麦和棉花田 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(1):1–3.
- XU Hua, XING Guang-xi, CAI Zu-cong, et al. Effect of soil texture on N_2O emissions from winter wheat and cotton fields[J]. *Agro-Environment Protection*, 2000, 19(1):1–3.
- [20] 叶欣, 李俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1186–1191.
- YE Xin, LI Jun, WANG Ying-hong, et al. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1186–1191.
- [21] Bender M, Conrad R. Microbial oxidation of methane, ammonium and carbon monoxide, and turnover of nitrous oxide and nitric oxide in soils[J]. *Biogeochemistry*, 1994, 27:97–112.
- [22] Flessa H, Dorsch P, Beese F, et al. Influences of cattle wastes on nitrous oxide and methane fluxes in pastureland[J]. *J Environ Qual*, 1996, 25:1366–1370.
- [23] Hutsch B W, Webster C P, Powlson D S. Methane oxidation as affected by landuse, soil pH and nitrogen fertilization[J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, 26:1613–1622.
- [24] Dunfield P, Knowles R. Kinetics of inhibition of methane oxidation by nitrate, nitrite, and ammonium in a humisol[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1995, 61:3129–3135.
- [25] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3):417–419.
- ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, DONG Wen-xu. Ammonia volatilization from wheat-maize rotation field in the piedmont of Taihang[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3):417–419.
- [26] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8):2094–2098.
- JIAO Yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Impact of different levels of nitrogen fertilizer on N_2O emission from different soils[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8):2094–2098.
- [27] Maag M, Vinther F P. Effect of temperature and water on gaseous emission from soils treated with animals larry[J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1999, 63(4):858–865.
- [28] Turunen J, Roulet N T, Moore T R, et al. Nitrogen deposition and increased carbon accumulation in ombrotrophic peatlands in Eastern Canada[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18:1–12.

致谢:感谢中国科学院栾城农业生态试验站对本研究工作的支持。