

田间管理对华北平原冬小麦产量土壤碳及温室气体排放的影响

万运帆, 李玉娥, 高清竹, 秦晓波, 林而达

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要:选取华北平原冬小麦为研究对象, 针对(1)秸秆移除;(2)秸秆表覆;(3)免耕;(4)秸秆深施;(5)施农家肥这 5 种典型的田间管理, 使用农田自动温室气体测定系统对冬小麦农田全生育期进行了原位长期观测, 并采用 ^{13}C 自然丰度法对土壤碳的转化进行了监测, 同时对冬小麦产量及生物量、土壤有机碳的变化进行了监测。结果表明, 冬小麦产量及生物量高低顺序为施农家肥、秸秆深施、秸秆表覆、秸秆移除和免耕, 而且土壤有机碳的更新也有同样的趋势; 施农家肥能显著增加土壤有机碳而秸秆移除和免耕则会导致土壤有机碳的轻微下降; 冬小麦甲烷的排放或吸收只占总增温潜势的不到 1%, 在进行统计总排放当量时基本可以忽略, N_2O 在总排放当量中的比例在 2.55%~11.62% 范围内; N_2O 的大量排放主要来自于拔节期及开花期, 秸秆移除、施农家肥和秸秆深施会导致 N_2O 排在总当量中的份额增加至 10% 左右, 而秸秆覆盖和免耕 N_2O 排在总排放当量中的份额只有 3 % 左右, 冬小麦农田总的温室气体排放 88% 以上来自于 CO_2 的排放, 特别是秸秆表覆和免耕 95% 以上来自土壤碳的损失而释放的 CO_2 。总体来看, 秸秆深施能保证较高的产量, 减少碳的损失, 增加土壤碳并产生相对较少的总温室气体排放量, 是较好的固碳减排方式。

关键词:冬小麦; 田间管理; 土壤有机碳; 温室气体排放

中图分类号: X16 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)12-2495-06

Field Managements Affect Yield, Soil Carbon, and Greenhouse Gases Emission of Winter Wheat in North China Plain

WAN Yun-fan, LI Yu-e, GAO Qin-zhu, QIN Xiao-bo, LIN Er-da

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Five dominant field managements in winter wheat field in North China Plain (NCP) are chosen as treatments. That is (1) residue removal (TRR), (2) residue mulch (TRM), (3) No Tillage (TNT), (4) residue incorporation (TRI) and (5) manure (TM). Using automatic chamber and GC measurement system in the field to monitor the greenhouse gases emitted from the field during whole season, by ^{13}C nature abundant method to monitor carbon turnover, winter wheat yield and soil organic carbon is also been monitored. The results showed that: The treatment yield in descending order is TM, TRI, TRM, TNT and TRR respectively, same tendency with the soil organic carbon (SOC) renewing percentage. TM can more significantly increase yield and SOC, while TRR and TNT can slightly drop the yield and SOC. The methane from winter wheat field is less than 1% to total GHG emission and maybe neglectable, and N_2O account for 2.55%~11.62% to total GHG emission in winter wheat field. The major N_2O emission start from jointing stage and TNT, TM, TRI has higher N_2O emission around 10% of total GHG emission, while TRR, TRR has lower N_2O emission around 3% of total GHG emission. CO_2 account for over 88% total GHG emission in winter wheat field and for TRM and TNT the portion is over 95%. In general comparison, TRI has relatively higher grain yield, SOC renewed and SOC increasing, and relatively lower GHG emission. It is a good method for carbon sequestration and GHG abatement.

Keywords: winter wheat; field managements; SOC; greenhouse gases

收稿日期: 2009-09-22

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAD17B01); 国家“十一五”科技支撑计划(2007BAC03A03)

作者简介: 万运帆(1973—), 男, 湖北洪湖人, 副研究员, 博士, 主要从事农业源温室气体排放研究。E-mail: wanyunfan@hotmail.com

通讯作者: 李玉娥 E-mail: yueli@ami.ac.cn

华北平原是中国最主要的粮食产地之一,约占中国可耕地面积的 22%。冬小麦和夏玉米是此平原上的两大主要农作物^[1]。近年来,随着农业种植水平的提高,农业种植方式的变化,农业机械作业的比例越来越大^[2-3],秸秆还田量呈不断上升趋势^[4],化学肥料使用量逐年增加,农家肥则有逐年减少的趋势^[5-6],这些农田管理措施的改变,必将对农田土壤碳的储存和转化、温室气体排放产生较大影响^[7-11]。为了探索不同的农业管理措施对农田土壤碳及温室气体的影响,通过选取几种典型的农业管理措施,比较它们在作物产量、固碳之间的差异,并对农田温室气体进行长期自动观测^[12],旨在找出较为适宜的农田管理措施,能提高或保持较高作物产量的同时固定土壤碳或减少温室气体的排放,为估算我国农田温室气体排放作参考。

1 材料与方法

1.1 试验点简介

此试验站位于华北平原的河北省栾城县中国科学院农业生态系统试验站(37°53'N, 114°41'E),海拔 50.1 m,处于半干旱季风气候区,近 20 年来的气候资料统计表明年均降雨量 480.7 mm,其中近 70%的降水集中在 6—8 月份,年均温 12.3 °C,年均总辐射 523.3 kJ·cm⁻²,年均日照时数 2 608 h,年均无霜期 202 d。当地主要的种植作物为冬小麦和夏玉米轮作,由于主要降水均集中于夏玉米生长季,小麦生长季降水较少,特别是在春季,小麦一般灌溉 2~3 次。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理,分别是(1)秸秆移除(TRR), (2)秸秆表覆(TRM), (3)免耕(TNT), (4)秸秆深施(TRI), (5)施农家肥(TM)。每个处理均依当地习惯施用同样的化学肥料,除了免耕处理外,其余 4 个处理均采用常规耕作。秸秆表覆和秸秆深施处理的秸秆施用量为 6 250 kg·hm⁻² 风干物质,农家肥处理的施用量为 12 500 kg·hm⁻² 新鲜农家肥,秸秆深施及农家肥首先施于表土然后耕翻于土壤中。

试验采取 3 次重复,随机区组设计,小区面积为 24 m²,试验地外围有 3 m 宽的保护行,试验小区分别在返青期、拔节期和开花期灌溉 1 次,每次灌溉量为 750 m³·hm⁻²。

1.3 温室气体测定及 $\delta^{13}\text{C}$ 测定

每个试验小区内都设有一个静态气体采样箱,箱子主体框架为不锈钢,顶面及四周为无色透明有机玻璃板嵌套,使用硅橡胶密封条密封,该采样箱长宽均

为 70 cm,高为 140 cm,无底座,底部埋入土中 20 cm 密封,箱子内部实际高度为 120 cm,箱子覆盖面积为 0.49 m²,箱内气体容积为 0.588 m³,内部装有两个混合风扇,箱子顶部可以由装在两侧的气缸驱动打开,箱体内部有用于测定空气温度和土壤温湿度的传感器。试验田间设有实验室,内有取样泵、气相色谱、空气压缩机、计算机等设备,静态箱开闭、取样、测定均由计算机自动控制,实时测定,盖箱时间为 30 min^[13],每 2 h 监测 1 次温室气体排放通量。

气相色谱使用美国 Agilent 公司的 HP5890 II,测定 CO₂ 与 CH₄ 分析柱为 Porpak.Q 填充柱,其中样品中 CO₂ 在 375 °C 通入 H₂ 先经 Ni 催化转化为 CH₄ 后再进入检测器分析,柱箱温度为 70 °C,载气为 N₂,检测器为 FID,工作温度 200 °C;测定 N₂O 分析柱也为 Porpak.Q 填充柱,分为一个预柱及一个分析柱,柱箱温度为 70 °C,载气为 N₂,检测器为 ECD,工作温度 330 °C;气相色谱仪在测试前使用标准气体进行了校准^[14]。

温室气体排放的统计分为 3 个阶段平均,分别是(1)越冬前(10 月 13 日至 11 月 28 日), (2)越冬期(11 月 29 日至 3 月 15 日), (3)越冬后(3 月 16 日至 6 月 6 日),温室气体排放通量以每个测定时间点的值加权平均,总的温室气体排放采用先加权平均再汇总的方式进行统计。

$\delta^{13}\text{C}$ 同位素测定使用 Thermo MAT-251 同位素质谱仪^[15]。

土壤有机碳的测定采用 Appolo9000 总碳分析仪进行测定。

2 结果与讨论

2.1 不同田间管理下土壤有机碳的变化

从土壤有机碳的变化来看(表 1),秸秆移除和免耕会导致土壤有机碳的下降,而施用秸秆或农家肥则会保持土壤有机碳的增长。这从另一个方面反映出仅靠残存于土壤中的植物根系并不能维持土壤碳。另外,免耕土壤有机碳下降 0.55%,远低于秸秆移除的 1.47%,说明在华北平原翻耕更易导致土壤碳的损失^[16]。多增加对土壤有机物料的投入不失为增加土壤有机碳的有效途径,农家肥投入量最大,土壤有机碳的增加量也最大,达到了 3.48%;秸秆深施比表覆显著增加土壤有机碳近 1%,虽然秸秆深施比表覆分解快、转化率高,但能明显减少碳的损失,更多的碳能固定到土壤中。

从表 1 中可以看出,不同田间管理措施土壤有机质的变化及更新率有很大差异。在播种前,秸秆深施及施农家肥处理比其他处理略高,但它们相互之间的差异并不明显, $\delta^{13}\text{C}$ 的值都在 -2.1% 左右,由于不同有机物料(秸秆、农家肥)的投入改变了土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的值,在小麦收获后,施用农家肥处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增量远大于其他处理,增加了 6.48%,主要是由于施入的农家肥的 $\delta^{13}\text{C}$ 比秸秆材料的低许多,而秸秆材料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,导致其他处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高。秸秆深施和表覆 $\delta^{13}\text{C}$ 降低较大,而免耕处理的 $\delta^{13}\text{C}$ 降低最少,只有 0.44%。通过 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化,可以计算出土壤有机碳的更新率^[17-19]。从土壤有机碳的更新率来看,各处理相互之间的差异均达到了显著水平。施农家肥更新率比其他处理高许多,达到约 30%的更新率,这主要归功于农家肥施用量大,而且是鲜料,在土壤中易于腐解。秸秆深施土壤有机碳更新率达到了 8.38%,显著高于秸秆表覆处理。这两个秸秆施用处理投入量相同,但仅因为深施就比表覆的土壤有机碳的转化率高出 68%。表明秸秆深施加速了秸秆的腐解和转化,另一方面由于冬小麦生长季雨水较少,秸秆表覆分解很慢,从小麦生长结束收获后发现许多表覆的秸秆没有分解也证实了这一点。免耕处理秸秆投入量小,对土壤扰动小,土壤有机碳的转化率也最小,只有 1.72%。

2.2 不同田间管理对冬小麦产量及生物量的影响

表 2 列出了不同田间管理对冬小麦产量及生物量的影响,从表中可以看出不同田间管理措施对冬小麦产量的影响趋势与表 1 中对土壤有机碳的影响趋势相同,其产量高低顺序为农家肥、秸秆深施、秸秆表覆、秸秆移除和免耕,除了秸秆深施与表覆之间差异不显著外,其他处理之间的差异达到了显著水平。相对于秸秆移除,施用有机肥处理产量提高了 23.4%,秸秆深施与表覆分别增产 8.3%和 5.1%,而免耕在此试验中则导致产量有 6.2%的下降。比较冬小麦生物

量及根量可以发现,它们与产量变化趋势基本一致。相关分析表明,小麦收获后土壤有机碳含量与冬小麦产量呈极显著正相关($R=0.935\ 8^{**}$, $n=6$),表明秸秆或农家肥还田不仅增加冬小麦产量,而且有利于土壤有机碳的累积。

表 2 田间管理对冬小麦产量及生物量的影响
Table 2 Field managements influence on winter wheat yield and biomass

处理	产量/kg·hm ⁻²	地上生物量/kg·hm ⁻²	根量/kg·hm ⁻²
秸秆移除	5 911.5cC (100.0)	7 592.8dD (100.0)	1 841.4cB (100.0)
秸秆表覆	6 212.0bBC (105.1)	7 996.3cC (105.3)	1 921.8bcB (104.4)
免耕	5 543.2dD (93.8)	7 257.8eD (95.6)	1 692.2dC (91.9)
秸秆深施	6 403.8bB (108.3)	8 431.1bB (111.0)	1 947.9bB (105.8)
农家肥	7 297.1aA (123.4)	9 494.6aA (125.0)	2 211.4aA (120.1)

注:产量后面小写、大写字母分别表示 5%和 1%LSD 显著检验,括号内的值为相对产量值。

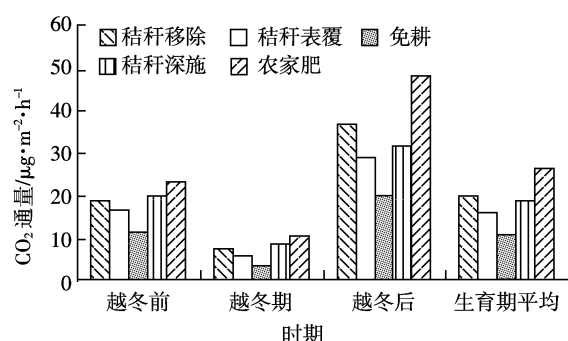
2.3 冬小麦温室气体排放

2.3.1 CO₂ 通量变化

图 1 分 3 个阶段显示出了冬小麦平均 CO₂ 通量及整个生育期的平均 CO₂ 通量。从图 1 可以明显看出对所有处理越冬后 CO₂ 平均通量最高,平均大约在 30 mgCO₂·m⁻²·h⁻¹。分别相当于越冬前和越冬期的 5~6 倍和 2 倍,越冬前的 CO₂ 通量与整个生育期平均 CO₂ 通量的大小和趋势基本一致。从不同处理 CO₂ 通量来看,其大小顺序是农家肥、秸秆移除、秸秆表覆、秸秆深施和免耕,除秸秆表覆与秸秆深施之间相差不明显外,其他处理之间差异非常明显,而且小麦不同生长阶段其趋势基本一致。由于测定的是净 CO₂ 排放速率,一方面受土壤排放的影响,另一方面还受植物生长吸收 CO₂ 的影响,表 2 中 3 种秸秆处理秸秆深施的生物量大于秸秆表覆和秸秆移除,其吸收的 CO₂ 量也相应较多^[20-21],但净 CO₂ 排放通量秸秆移除的最大,其次是秸秆深施,这反映出秸秆移除处理吸收 CO₂ 大大

表 1 不同田间管理措施土壤有机碳的变化及更新率
Table 1 Changing and renewing rate of SOC in different field managements

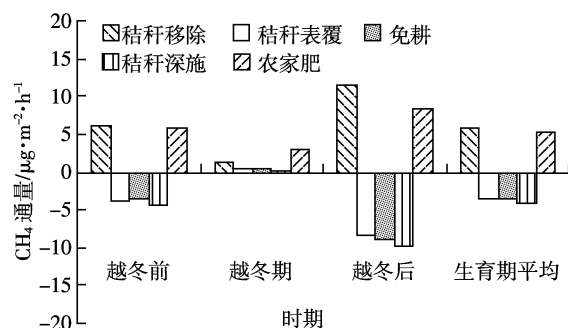
处理	土壤及材料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值/ $\%$			投入量/ t C·hm ⁻²	$\delta^{13}\text{C}$ 变化/ $\%$	土壤 SOC 更新/ $\%$	土壤有机碳/g C·kg ⁻¹ 土		
	播前土壤	收后土壤	投入物料				播种前	收获后	增加/ $\%$
秸秆移除	-21.15	-21.34	-26.80	0.36	-0.90	3.39d	13.41	13.22	-1.47d
秸秆表覆	-21.25	-21.51	-26.53	7.62	-1.24	4.99c	13.43	13.66	1.70c
免耕	-21.36	-21.45	-26.81	0.44	-0.44	1.72e	13.43	13.35	-0.55e
秸秆深施	-20.54	-21.04	-26.53	7.63	-2.45	8.38b	13.52	13.88	2.63b
农家肥	-20.77	-19.43	-16.25	25.8	6.48	29.76a	13.78	14.26	3.48a

图1 冬小麦生长季分阶段 CO₂ 通量Figure 1 CO₂ Flux in winter wheat growing season

少于土壤排放的 CO₂, 导致 CO₂ 通量较高, 而秸秆深施处理植物生长量大, 吸收 CO₂ 较多, 抵消了很大一部分土壤排放的 CO₂, 导致 CO₂ 通量相对较低。

2.3.2 CH₄ 通量变化

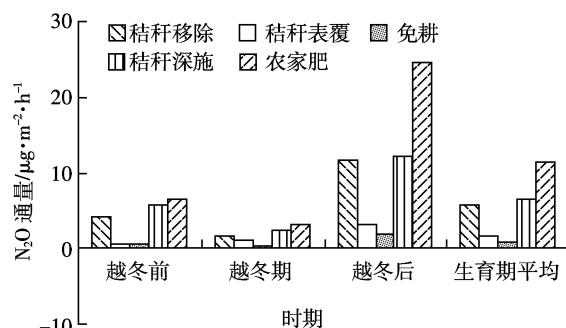
图2是冬小麦分阶段 CH₄ 通量图。不同处理不同时期 CH₄ 通量表现各不相同, 其中在越冬期 CH₄ 通量全部为正值, 但通量值都非常小, 平均值均在 3 μg CH₄·m⁻²·h⁻¹ 以下, 说明冬季土壤冻结后不利于土壤排放 CH₄, 也不利于 CH₄ 的氧化。而越冬前和越冬后两阶段表现出来的通量值比较相似, 秸秆表覆、免耕和秸秆深施处理的 CH₄ 通量为负值, 对 CH₄ 排放有一定的吸收作用, 其中秸秆表覆和免耕两者差异不大, 秸秆深施甲烷的吸收略大, 而秸秆移除和农家肥处理 CH₄ 通量为正值, 表现出净的 CH₄ 排放^[2]。全生育期平均排放通量秸秆移除与施农家肥通量基本相当, 均为正值, 通量值为 6 μg CH₄·m⁻²·h⁻¹ 左右, 而用秸秆表覆与免耕通量值非常接近, 均为负值, 秸秆深施的 CH₄ 通量略小于前者, 说明秸秆施用或免耕处理对 CH₄ 有一定的吸收作用。这主要是秸秆施用改善了土壤的通气状况, 更有利于甲烷的氧化和对空气中 CH₄ 的吸收。而农家肥由于施用量大, 施用的是鲜料, 含水

图2 冬小麦生长季分阶段 CH₄ 通量Figure 2 CH₄ Flux in winter wheat growing season

量较大, 对 CH₄ 的排放有促进作用^[23]。不过, 从总体上来看, 华北平原冬小麦农田 CH₄ 无论是排放或吸收的速率都相对较低, 大部分都在 10 μg CH₄·m⁻²·h⁻¹ 以下, 对总的温室气体的排放影响有限。

2.3.3 N₂O 通量变化

图3显示的是冬小麦不同阶段 N₂O 通量。从图中可以发现 N₂O 通量在越冬后速率明显高出其他阶段很多倍。而在越冬期, N₂O 通量很低, 基本没有 N₂O 放出。不同处理之间 N₂O 通量差异较大, 农家肥处理 N₂O 通量值比其他处理高出许多, 这可能是由于农家肥中废弃物多, 碳氮比较低, 更有利于 N₂O 的产生^[24-25]。秸秆移除和秸秆深施两者的 N₂O 排放通量比较接近, 但两者产生的原因可能不一致, 秸秆移除后土壤翻耕有利于 N₂O 的排放, 而秸秆深施比秸秆表覆更易分解, 从而能放出更多的 N₂O。

图3 冬小麦生长季分阶段 N₂O 通量Figure 3 N₂O Flux in winter wheat growing season

2.3.4 总的温室气体排放

冬小麦生长阶段总的温室气体排放和依据全球增温潜势(GWP)折算的总的增温效果列于表3, 其中 CH₄ 以 21 倍的 CO₂ 当量计算, N₂O 以 310 倍 CO₂ 当量计算。冬小麦全生育期总的温室气体排放相当于 CO₂ 当量的排放量顺序是农家肥、秸秆移除、秸秆深施、秸秆表覆和免耕。其中除秸秆移除与秸秆深施相互之间差异不显著外, 其他处理之间的差异达到了显著水平。从各处理温室气体排放所占总排放的比例来看, CO₂ 排放占主要, 处于 88%~98% 之间; 而 CH₄ 排放占总温室气体的比重非常小, 无论是排放或吸收均不到总排放的 1%; N₂O 排放所占比例从 2.55% 至 11.62%, 其中秸秆表覆和免耕所占比例很低, 只有 3% 左右, 而秸秆移除、秸秆深施和施农家肥 N₂O 排放比例较高, 达 8%~11.62%。

从增产、固碳和减排方面来综合评价, 施农家肥虽然产量高、固碳量大, 但排放量非常高, 秸秆移除不

仅不利于产量和固碳,排放量也较高。秸秆深施虽然施量居中,但增产和固碳较秸秆表覆相对要高许多,从总体上要好于秸秆表覆。免耕虽然排放量最低,但对产量及固碳极为不利,不值得推荐。

表 3 冬小麦生长季总的温室气体排放

Table 3 Net GHG emission in whole winter wheat period

处理	全生育期净排放/kg·hm ⁻²				增温效应/%		
	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	All CO ₂ e*	CH ₄	CO ₂	N ₂ O
秸秆移除	0.33	1 137.06	0.32	1 244.47b	0.56	91.37	8.07
秸秆表覆	-0.20	913.36	0.10	939.81c	-0.45	97.19	3.27
免耕	-0.20	614.92	0.05	626.64d	-0.68	98.13	2.55
秸秆深施	-0.24	1 069.06	0.37	1 179.57b	-0.43	90.63	9.79
农家肥	0.31	1 513.85	0.64	1 720.12a	0.37	88.01	11.62

注:* 通过 5%LSD 检验。

3 结论

(1)施用农家肥虽然能大大增加土壤碳和产量,但对温室气体减排极为不利。

(2)比较秸秆移除、表覆和深施这几种秸秆处理方式,秸秆深施能获得较高的产量和固碳效果,同时温室气体的排放量适中,是较好的秸秆处理方式。

(3)华北平原冬小麦仅施用化肥的前提下秸秆不还田或免耕会导致土壤碳的下降。

(4)华北平原冬小麦地 CO₂ 净排放是总的排放来源,约占 88%~98%,N₂O 排放所占比例以秸秆移除、秸秆深施和施农家肥较高,达 10%左右。CH₄ 占总排放比例不超过±1%,无论是作为源还是汇,效果均不明显。

(5)各处理不同阶段温室气体排放均是以越冬后排放量最大,而冬季排放量很小。

参考文献:

- [1] 陈百明. 中国土地利用与生态特征区划[M]. 北京:气象出版社, 2003:120.
CHEN Bai-ming. The division of China's land use and ecological characteristics[M]. Beijing: Meteorological Press, 2003:120.
- [2] 中华人民共和国农业部. 中国农业发展报告[M]. 北京:中国农业出版社, 2006:37-39.
The People's Republic of China Ministry of Agriculture. China agricultural development report[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006:37-39.
- [3] 《中国农业年鉴》编辑部. 中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2008:251-254.
"China's Agricultural Yearbook" Editorial. China agricultural yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008:251-254.
- [4] 张玉铭, 胡春胜, 毛任钊, 等. 河北栾城县农田土壤养分肥力状况与调控[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4):68-72.
ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, MAO Ren-zhao, et al. Hebei Lu-an Cheng County soil nutrient status and fertility regulation[J]. *For Agricultural Research in Dry Areas*, 2003, 21(4):68-72.
- [5] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2007:45.
National Bureau of Statistics Rural Social and Economic Investigation Division. China's rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007:45.
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2008:451-453.
The People's Republic of China National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2008:451-453.
- [7] 白红英, 韩建刚, 张一平. 覆盖种植措施对农田土壤中 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4):394-396.
BAI Hong-ying, HAN Jian-gang, ZHANG Yi-ping. Effects of mulching and planting on N₂O discharge flux from [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(4):394-396.
- [8] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 不同农业措施下冬小麦农田 N₂O 通量特征研究[J]. 中国农业气象, 2008, 29(2):130-133.
WAN Yun-fan, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Characteristics of N₂O flux in winter wheat field under different field managements[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(2):130-133.
- [9] 刘运通, 万运帆, 林而达, 等. 春玉米施肥前后 N₂O 通量日变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):997-1002.
LIU Yun-tong, WAN Yun-fan, LIN Er-da, et al. Spring fertilizing corn before and after the characteristics of diurnal variation of N₂O flux[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):997-1002.
- [10] 董玉红, 欧阳竹. 有机肥对农田土壤二氧化碳和甲烷通量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7):1303-1307.
DONG Yu-hong, OUYANG Zhu. Effects of organic manures on CO₂ and CH₄ fluxes of farmland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7):1303-1307.
- [11] 樊丽琴, 南志标, 沈禹颖, 等. 保护性耕作对黄土高原小麦田土壤微生物量碳的影响[J]. 草原与草坪, 2005(4):51-54.
FAN Li-qin, NAN Zhi-biao, SHEN Yu-ying, et al. Effects of conservation tillage practices on soil microbial biomass carbon in wheat field in the Loess Plateau[J]. *Grassland and Turf*, 2005(4):51-54.
- [12] 高志岭, 陈新平, 张福锁, 等. 农田土壤 N₂O 排放的连续自动测定方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 64(1):64-70.
GAO Zhi-ling, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo, et al. Continuous-automatic method for measuring N₂O emission from agricultural soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 64(1):64-70.
- [13] 万运帆, 李玉娥, 林而达, 等. 静态箱法测定旱地农田温室气体时密闭时间的研究[J]. 中国农业气象, 2006, 27(2):122-124.
WAN Yun-fan, LI Yu-e, LIN Er-da, et al. Studies on closing time in measuring greenhouse gas emission from dry cropland by static chamber method[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(2):122-124.
- [14] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4

- (10):84-90.
- WANG Yue-si, LIU Guang-ren, WANG Ying-hong, et al. Simultaneous measurement of CO₂, CH₄ and N₂O emission from terrestrial ecosystem with one improved gas chromatography[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(10):84-90.
- [15] Balesdent J, Mariotti A. Measurement of soil organic matter turnover using ¹³C natural abundance[C]//Boutton T W, Yamasaki S(Eds.), *Mass Spectrometry of Soils*. New York: Marcel Dekker, 1996:83-111.
- [16] 朱咏莉, 韩建刚, 吴金水. 农业管理措施对土壤有机碳动态变化的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(5):648-651.
- ZHU Yong-li, HAN Jian-gang, WU Jin-shui. Effect of agricultural practices on soil organic carbon dynamics [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(5):648-651.
- [17] Balesdent J, Balabane M. Maize root-derived soil organic carbon estimated by natural ¹³C abundance [J]. *Soil Biol Biochem*, 1992, 24:97-101.
- [18] 沈其荣, 殷士学, 杨超光, 等. ¹³C 标记技术在土壤和植物营养研究中的应用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1):98-105.
- SHEN Qi-rong, YIN Shi-xue, YANG Chao-guang, et al. Application of ¹³C labelling technique to soil science and plant nutrition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1):98-105.
- [19] 窦森, 张晋京. 用 ¹³C 值研究土壤有机质周转的方法及其评价[J]. *吉林农业大学学报*, 2001, 23(2):64-67.
- DOU Sen, ZHANG Jin-jing. Introduction of a method for studying turnover of soil organic matter[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2001, 23(2):64-67.
- [20] 郎红东, 杨剑虹. 土壤 CO₂ 浓度变化及其影响因素的研究[J]. *西南农业大学学报*, 2004, 26(6):731-739.
- LANG Hong-dong, YANG Jian-hong. Study of CO₂ concentration changes in soil profile and its affecting factors [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2004, 26(6):731-739.
- [21] 严红, 魏堤, 张雷, 等. 有机物料施用量对土壤 CO₂ 排放速率的影响[J]. *大连大学学报*, 2005, 26(4):46-50.
- YAN Hong, WEI Shi, ZHANG Lei, et al. Influence of organic material amount on CO₂ released rate from the soil[J]. *Journal of Dalian University*, 2005, 26(4):46-50.
- [22] 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.
- 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.
- [23] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH₄ 和 CO₂ 排放通量的影响初探[J]. *中国农业气象*, 2004, 25(3):8-10.
- WAN Yun-fan, LIN Er-da. The influence of tillage on CH₄ and CO₂ emission flux in winter fallow cropland [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(3):8-10.
- [24] 潘志勇, 吴文良, 刘光栋, 等. 不同秸秆还田模式与氮肥施用量对土壤 N₂O 排放的影响[J]. *土壤肥料*, 2004(5):6-8.
- PAN Zhi-yong, WU Wen-liang, LIU Guang-dong, et al. Effect of straw return and nitrogen fertilizer application on the N₂O emission of soil[J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(5):6-8.
- [25] 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-Environmental Science*, 2005, 24(6):1186-1191.