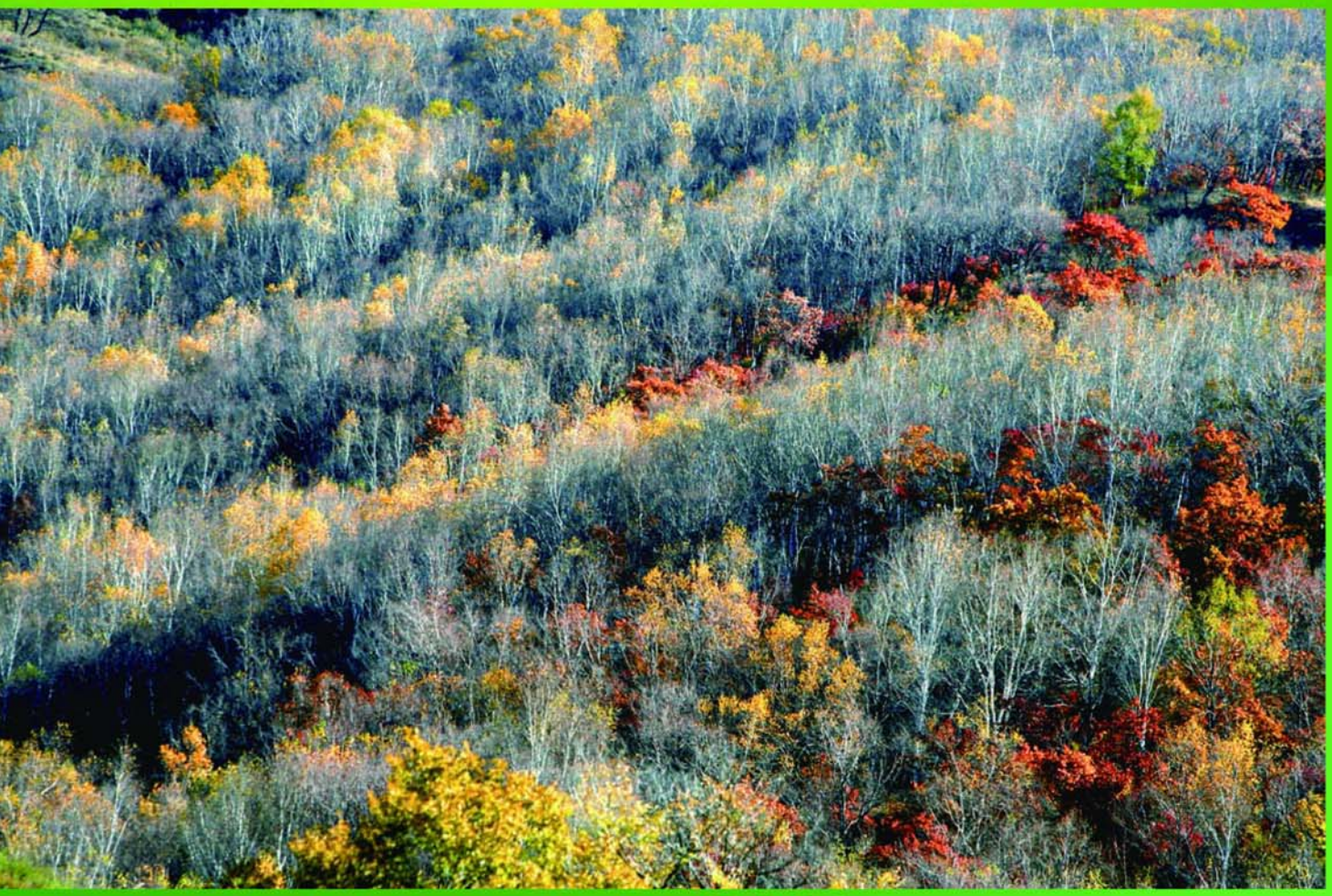
ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第16期 Vol.31 No.16 2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

（SHENGTAI XUEBAO）

第 31 卷 第 16 期　　2011 年 8 月　（半月刊）

目　　次

专论与综述

问题讨论

研究简报

期刊基本参数：CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ￥70.00 * 1510 * 35 * 2011-08

封面图说：在长白山麓低海拔地区的晚秋季节，成片的白桦林用无数根白色的树干、树枝烘托着林冠上跳动的金黄色叶片，共生的柞木树冠用更浓重的颜色显示了它的存在，整个山梁层林尽染，秋意浓浓。

彩图提供：陈建伟教授　国家林业局　E-mail：cites.chenjw@163.com

王小彬,王燕,代快,武雪萍,赵全胜,张丁辰,冯宗会,蔡典雄. 旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡. 生态学报,2011,31(16):4638-4652.
Wang X B, Wang Y, Dai K, Wu X P, Zhao Q S, Zhang D C, Feng Z H, Cai D X. Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4638-4652.

旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡

王小彬[1,2],王 燕[1],代 快[1],武雪萍[1,2],赵全胜[1],张丁辰[1],冯宗会[1],蔡典雄[1,2,*]

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业部植物营养与养分循环重点实验室,北京 100081;
2. 农业部旱作节水农业重点实验室,北京 100081)

摘要:加强农田土壤保持耕作管理,科学认识和调控农田耕作系统能流碳流,提高农业生态系统固碳减排能力,对于减缓农业对全球温室效应的贡献具有重要意义。以北方半湿润偏旱区山西寿阳旱作春玉米土壤保持耕作试验研究为基础,利用田间定位观测数据、辅助能投入参数,土壤呼吸田间原位测定,以及农业生态系统能量/碳平衡分析及碳循环过程模拟方法,综合分析和比较不同耕作(CT 传统、RT 少耕和 NT 免耕)系统能量/碳平衡及能-碳关联影响。与 CT 比较,采用 RT 和 NT 措施下工业能耗 CO_2-C 损失降低约 4%—12%(相当 11—35 kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})。在 RT 和 NT 系统下耗能系数可降低约 6%—10%,能量生产效率可提高约 7%—12%。2006—2007 年由田间原位测定土壤呼吸 CO_2-C 释放通量估算,在玉米休闲期(尤其是秋耕处理后),NT 条件下土壤呼吸速率一般为最低(NT <CT <RT),而在玉米生长高峰期为最高。玉米休闲期土壤呼吸通量(kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})平均为:NT(540±30)<CT(619±20)<RT(873±137),NT 较 CT 降低约 13%。玉米生育期土壤呼吸通量(kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})平均为:CT(1368±355)<RT(1468±387)和 NT(1465±410),RT 和 NT 较 CT 提高约 7%。比较不同耕作处理全年土壤呼吸总量(kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})平均为:RT(2342±524)>NT(2005±380)>CT(1987±375)。不同耕作下的玉米籽粒产量与生育期土壤呼吸通量趋势基本吻合,如 2006-2007 年玉米产量(kg·hm^{-2}·a^{-1})平均为,RT(5614±268)>NT(5533±564)>CT(5487±278)。玉米籽粒产量与生育期土壤呼吸通量之间呈密切相关(R^2=0.88)。本研究结果得出,RT 和 NT 对农田耕作系统的影响呈碳汇效应,且一般为 NT >RT;而 CT 处理表现为碳源。RT 和 NT 通过增加土壤碳投入是维持和提高土壤有机碳的有效途径。

关键词:土壤保持耕作;农业生态系统;能量平衡;碳平衡

Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems

WANG Xiaobin[1,2], WANG Yan[1], DAI Kuai[1], WU Xueping[1,2], ZHAO Quansheng[1], ZHANG Dingchen[1], FENG Zonghui[1], CAI Dianxiong[1,2,*]

1 *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, Beijing* 100081, *China*

2 *Key Laboratory of Dryland Farming Ministry of Agriculture, Beijing* 100081, *China*

Abstract: Scientific regulation of both energy and carbon flows under tillage system with soil conservation tillage practices is of great significance for saving energy input in farmland, mitigating greenhouse gas emission to the atmosphere, and increasing carbon sequestration potential in soils. Based on the field experimental studies on conservation tillage in dryland maize cropping systems, located in Shouyang Dryland Farming Station in Shanxi province of China, impacts of different tillage systems (including conventional tillage (CT), reduced-tillage (RT), and no-till (NT) practice) on coupled energy /carbon balance were integrally studied. through field observations, embodied energy input parameter determinations, soil respiration measurements, carbon dynamic processe simulations, and energy /carbon balance estimations in dryland agro-

基金项目:国家重点基础研究发展"973"计划项目(2011CB100501 /2007CB109305);国家自然科学基金(40571151);国家"863"计划项目(2006AA100220)资助

收稿日期:2010-08-26; **修订日期**:2011-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dxcai@ caas. ac. cn

ecosystems. Compared with CT, conservation tillage (RT and NT) could increase carbon input (about 1.6 tC·hm^{-2}) with increasing stover return and root stubble biomass in the soils, but reduce carbon losses by stover burning /or removal (about 1.6 tC·hm^{-2}) and by soil erosion (about 1.2—1.6 tC·hm^{-2}). The energy inputs (MJ·hm^{-2}) were in the order: CT (13829) >RT(13289) >NT(12434), which was similar to the order for carbon emissions (kgC·hm^{-2}): CT(283) >RT (272) >NT(248). The embodied energy consumption was reduce by about 4%—12% (equivalent to 11—35 kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1}) with NT and RT practices, as compared to the CT practice. The coefficiency of energy consumption was decrease by about 6%—10% and the coefficiency of energy production increase by 7%—12% under conservation tillage systems, as compared to the CT practice. The results also showed that the rates of soil organic carbon sequestration (kg C·hm^{-2}·a^{-1}) tended to increase from −104 with CT to 144—149 with NT and RT. The field measurements during periods 2006—2007 showed that the mean soil respiration rates (kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1}) with NT were generally lowest (−13%) during the fellow periods in the order: NT (540±30) <CT (619±20) <RT (873±137), but highest (+7%) at the peak of maize growing periods in the order: CT (1368±355) < NT (1465±410) and RT (1468±387). The mean total rates of soil respiration (kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1}) were RT (2342±524) >NT (2005±380) >CT (1987±375). The changes in maize grain yields showed the same trend with soil respiration associated with tillage practices, for instance, the mean maize grain yields (kg·hm^{-2}·a^{-1}) also were RT (5614±1298) >NT (5533±631) >CT (5487±1320), showing a positively close relationship between maize grain yields and soil respiration during growing stage (R^2=0.88). Although different methods were used to estimate CO_2-C emissions by soil respiration processes, the analysis showed the same trends in carbon sink /source under tillage systems, such as a increasing trend in carbon sink with conservation tillage practices (generally RT >NT) compared to carbon source with CT, indicating that stover incorporation combined with conservation tillage practices through increasing carbon input is an effective way for maintenance and enhancement of soil organic carbon.

Key Words: conservation tillage; agro-ecosystem; energy balance; carbon balance

近几十年来,农业活动如传统耕作导致农田土壤 CO_2 排放增加的事实已经表明农业是影响气候变化的主要因素之一[1]。土壤耕作是农业生产系统主要的能耗过程,直接影响系统能量/碳变化过程,对大气 CO_2 增减和土壤有机碳(SOC)变化具有重要贡献。土壤保持耕作是农业系统少投节能固碳重要措施之一,目前被认为是一项具有直接降低 CO_2 排放潜力且提高土壤固碳减排作用的有效农业措施之一,因而受到全球广泛关注[2-5]。

自 20 世纪 80 年代,国外学者从农业生态系统农田养分循环过程方面开展了土壤保持耕作研究[6-7]。20 世纪 90 年代,随着人们对全球变化和环境问题的重视,农业生态系统能量分析方法[8-10]被应用于土壤耕作系统评价研究[11-12],并将对耕作系统能耗经济分析与 CO_2 排放及土壤固碳联系起来[13-16]。2000 年以来,土壤保持耕作的环境效应如不同耕作措施对土壤呼吸[17]、碳固定和 CO_2 排放及其对减缓温室效应的贡献引起越来越多的关注[18]。90 年代中后期以来,农业生态系统土壤碳循环模型及模拟方法研究和应用得到发展[19-34]。

中国作为世界上一个重要的农业大国,由于土地耕种历史悠久,长期采用低水平的粗放农作经营方式、频繁翻耕、不当施肥、作物残茬清除或焚烧,土壤侵蚀和土壤退化等原因[35],已经造成了中国陆地生态系统尤其耕地土壤碳贮量目前处于一种低水平状态[36]。因此,通过改善耕作和施肥等农业措施,提高农业生态系统碳汇和减排能力,对于减缓农业对全球温室效应的贡献具有重要影响。由于土壤耕作是最主要的人工辅助能投入或能耗过程,直接或间接影响系统的能耗(排放 CO_2)和土壤碳循环及有机质分解(释放 CO_2),影响大气温室气体(以 CO_2 为主)的浓度变化,这一过程反映了农田耕作系统能流对碳流的影响及二者关联。20 世纪 80 年代中至 90 年代期间国内外学者对农业系统能量平衡分析已有很多研究[37-39],鉴于用能量指标评价农业生产效率可将农田系统中多种不同量纲的投入和产出在统一量纲下进行评价对比,能流分析和测算方法逐渐完善[9-10,38-43]。尽管我国在农业生态系统能量分析、农田系统 CO_2 排放和土壤碳循环方面分别都有开展研究,然

而,对于旱地农田保持耕作系统能流和碳循环关联影响方面研究及评价仍较少,往往忽视农田系统土壤固碳减排净效应的估算。本研究通过旱地农田土壤保持耕作试验和碳循环模拟研究、以及农业生态系统能量/碳平衡分析,为科学认识和定量描述农田耕作系统能量/碳平衡,增强旱地农田系统碳汇和减排管理提供参数依据。

1 材料与方法

1.1 研究思路和方法

本研究从农田耕作系统水平能流/碳流平衡观点出发,以北方半湿润偏旱区农田土壤保持耕作试验研究为基础,利用田间定位观测数据、辅助能投入参数分析,土壤呼吸田间原位测定,结合模型模拟预测,试图定量描述系统外部辅助能量/碳投入对系统内部能量/碳循环、能量/碳产出、以及能流-碳流关联影响及碳循环动态过程。

(1)建立农田耕作系统能流/碳流平衡概念模型,界定农田土壤-作物系统边界,概念性描述系统内外部参与能流-碳流循环过程及元素结构关系。

(2)根据田间试验测定/当地农田耕作系统气象、管理、土壤-作物等特征参数,运用能量分析/动态过程模拟(如选用 Century 模型)等,研究确定系统碳循环过程各要素能/碳流通量变化。

(3)估算分析耕作系统能流(量)输入与输出平衡、耕作管理系统土壤-作物-大气碳循环过程主要碳收支项平衡,比较不同耕作系统能/碳收支平衡及耕作管理碳汇/源影响。

1.1.1 农田耕作系统能/碳流基本概念模型及其边界条件

为探索和定量描述农田耕作系统参与能流-碳流循环过程及系统内部和系统外部元素结构关系,首先建立农田耕作系统能流/碳流平衡概念模型(图 1),并界定农田土壤-作物系统边界条件。

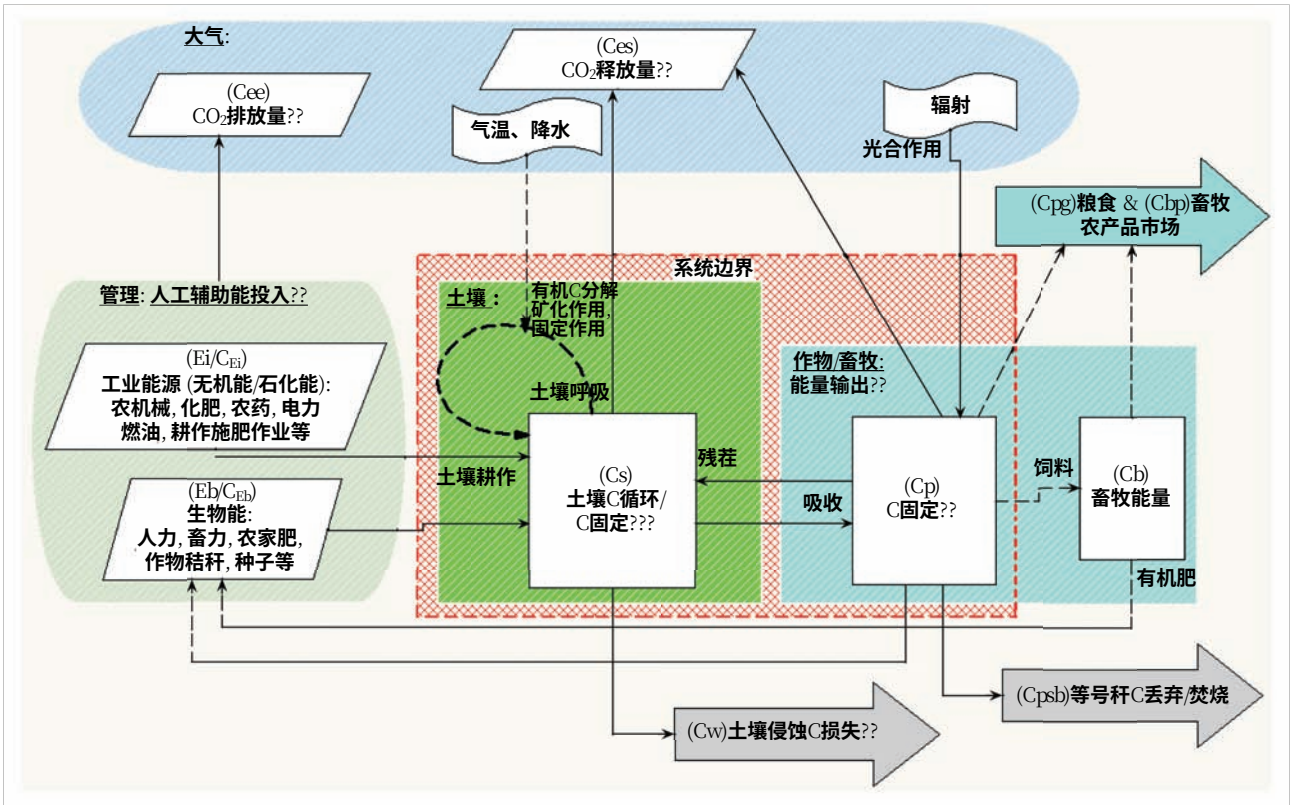


图 1 农田土壤耕作系统能流/碳流平衡概念模型

Fig. 1 The concept model of coupled energy and carbon flows balance in soil tillage systems

系统内部元素 (1)土壤项:与土壤 C 固定(Cs)有关的土壤碳循环过程;(2)作物项:作物光合作用(Cp)

有关的植物碳累积过程。

系统外部元素　(1)管理项:包括以工业能源(Cei)和生物能(Ceb)为主的人工辅助能消耗与转化过程;(2)大气项:包括降水、气温、光照等气象因素影响过程。

系统内外部碳移出或损失项　(1)农产品输出项:包括籽粒(Cpg)和秸秆饲料(Cb);(2)碳排放项:与人工辅助能耗相关的 CO_2-C(Cee)排放和与土壤呼吸有关的 CO_2-C(Ces)释放过程;(3)侵蚀项:水土流失过程(Cw);(4)农弃物或秸秆焚烧(Cpsb)。

1.1.2　农田耕作系统相关特征参数及碳收支平衡分析

根据田间试验测定/当地农田耕作系统气象、管理、土壤-作物特征等确定模型参数,运用能流(量)分析/动态过程模拟等手段研究确定系统碳循环过程各要素能/碳流通量变化。测定与估算系统碳平衡如下:

$$\text{系统碳平衡}(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}) = f(Cpg, Cpr, Cps, Cbm, Cee, Ces, Cw, Cpsb)$$

$$\text{系统碳平衡}(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}) = \text{系统 C 投入} - \text{系统 C 输出}$$

$$= (Cpg + Cpr + Cps + Cbm) - (Cpsb + Cw + Cee + Ces)$$

其中:

$Cp(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1})$ = 每年作物光合作用有关的植物碳累积过程(≈Cpg + Cpr + Cps)

$Cpr(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1})$ = 每年作物根茬 C 量参与农田土壤 C 循环的生物量

$Cps(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1})$ = 每年以作物秸秆为主的生物能参与农田土壤 C 循环的用量

$Cbm(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1})$ = 每年以农家肥为主的生物能参与农田土壤 C 循环的用量

$Cpsb(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1})$ = 每年作物秸秆丢弃/焚烧引起的 C 损失量(根据田间试验不同耕作·处理估算)

$Cw(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1})$ = 每年由风蚀水蚀引起的土壤 C 损失量(根据 Wang 等[44]田间试验测定估算)

$Cee\ (kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1})$ = 每年以工业能源为主的人工辅助能投入量相当的 CO_2-C 量(≈Cei)。以工业能源为主[9,45]

$Ces\ (kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1})$ = 每年与土壤呼吸有关的 CO_2-C 释放通量(Ces ≈有机物分解 + 微生物呼吸+ 根呼吸)

土壤呼吸估测方法:(1)田间原位测定。用碱吸收滴定法在田间原位测定不同耕作系统作物生长过程土壤呼吸 CO_2-C 释放通量[46]。(2)土壤有机物分解 C 量估算。根据文献资料和试验测得的有机物料(如秸秆、牛粪、根茬和有机质)分解系数[47]估算有机物分解 C 量($kgC\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)(表 1)。根据 Wang 等估算[48],每年投入有机物料和有机质分解释放 CO_2-C 量($kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$) = k_{ps}× 秸秆碳(Cps)+k_{bm}× 牛粪碳(Cbm) + k_{pr}× 根茬碳(Cpr)+ks × 土壤有机碳(Cs)。(3)土壤有机碳平衡方程估算。由 Wang 等试验和模拟得出[49],每年因呼吸导致的碳释放量($tC\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$) = (1 − 0.1566)$x$−0.1987)。(4)土壤呼吸释放 CO_2-C 量模拟估测。应用 Century 模型[50],模拟长期不同耕作能量/碳管理土壤-作物系统土壤呼吸 CO_2-C 释放量($kgC\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)。

表 1　估算土壤呼吸所采用的秸秆、牛粪、根茬和有机质分解系数(山西寿阳)[48]

Table 1　Decay coefficients for stover, manure, stubble + roots and soil organic matter (SOM) **in the calculation of C balances and the estimation of soil respiration** (Shouyang, Shanxi)[48]

项目 Iterm	有机物分解系数 Decay coefficients
秸秆 stover (k_{ps})	0.8
牛粪 manure (k_{bm})	0.48
根茬 Stubble+roots (k_{pr})	0.55
土壤有机质 SOM (k_s)	0.0285

1.1.3　农田耕作系统能投参数调研估测及能量平衡分析

通过对试验区相关基础资料、试验数据、能流和碳流分析、模型模拟所需数据收集和调研(包括气象数据、土壤、作物、能投及管理等参数),获取当地农田耕作系统人工辅助能量,包括工业能源和生物能投入有关参数[35],如机耕用柴油(45 MJ/kg)、化肥(N 和 P_2O_5分别为 91 MJ/kg 和 91 MJ/kg)、农药(102 MJ/kg)、和种

子(16 MJ/kg)等生产和农田管理过程消耗能量),用于估算与能耗有关的 CO_2-C 排放能量,估测和比较不同耕作管理系统能投、能量输出、能量转化利用效率、农业辅助能产投比等。估算分析耕作系统能流(量)输入与输出平衡、土壤-作物-大气碳循环过程主要碳收支项平衡,以及能流-碳流关联影响。有关能量平衡分析估算方法[13,35]如下:

人工辅助能投入(GJ/hm^2)= 农机械、肥、药等生产和管理过程耗能

系统 CO_2排放量(GJ/hm^2或 kg/hm^2)= 与人工辅助能耗相关的 CO_2-C 排放量

系统能量输出(GJ/hm^2) = 作物产量(kg/hm^2)×产量能量系数(GJ/kg)

系统净能量输出(GJ/hm^2)= 系统能量输出-系统能量投入

系统能量生产效率(t 籽粒·GJ^{-1})= 能量输出(t/hm^2)/人工辅助能投入(GJ/hm^2)

系统耗能强度或系数(GJ·t 籽粒$^{-1}$)= 人工辅助能投入(GJ/hm^2)/能量输出(t/hm^2)

农业辅助能产投比 = 能量输出(GJ/hm^2)/人工辅助能投入(GJ/hm^2)

1.2 田间试验

1.2.1 试验区概况

试验地点设在山西寿阳旱农试验区,位于山西晋中地区寿阳县。该区属中纬度暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候区。年均降水量约 520 mm。一年一作春玉米播种面积占粮食播种面积的 50% 以上。该区大部分土地地势较高(海拔 1066—1159 m),长年因受自然气候的影响,水土流失与土壤剥蚀切割严重,形成黄土丘陵地貌。当地农民习惯于采用秋、春两次耕翻和春季翻埋化肥的耕作与施肥方式。加之耕作粗放,有机肥来源缺乏,肥料投入少,农作物秸秆未能充分利用,土壤养分状况多数处于中下等水平。由于该区春季玉米播种期一般多风少雨,春耕翻+春施肥加剧了土壤风蚀和干旱程度。春旱是该区春玉米萌发主要限制因素。

1.2.2 试验设计及方法

旱地农田玉米保护性耕作试验于 2003 年开始在寿阳宗艾村旱农试验区布置实施。试验地选在较平缓的旱塬、无灌溉条件的砂质壤土的褐土上。基础土壤养分含量为:有机质 25.7 g/kg,全 N 1.04 g/kg,速效 N (NH_4^++NO_3^-)54 mg/kg,速效 P 7.3 mg/kg,速效 K 92.9 mg/kg,pH 值 7.87。供试玉米品种选用当地推荐品种。

试验处理为:(1)CT 传统耕作(传统秋后秸秆移出秋耕翻(秸秆残留量约 25%)+传统春施化肥并春耕翻);(2)RT 少耕(采取秋后秸秆还田(残茬还田量约 90%)少耕并配合秋施化肥);(3)NT 免耕(采用起垄免耕并垄上种植。秋后将秸秆顺行推倒免耕覆盖(残茬还田量约 90%),春季采取垄上免耕施肥播种并将秸秆移至垄沟)。每年不同耕作处理 NP 施肥量为 105 kg/hm^2。肥料为复合肥 20-20-0(N%-P%-K%)。小区面积为 10 m × 5 m=50 m^2;重复 3 次。

1.3 样品测试及分析方法

1.3.1 土壤呼吸的测定

2006—2007 年期间测定不同耕作处理玉米生育期和休闲期土壤呼吸动态变化。土壤呼吸测定采用静态室间吸收滴定法。圆柱形容器规格为高 25 cm 和直径 29 cm,顶端密闭,在测定当天选好地点安置密闭气室,气室内放置 1 个盛有 20 mL 浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液的烧杯,同时设空白对照(即在一两端封闭的同等容器中放置同样浓度的 NaOH 溶液)。在容器上加以重物保证容器的密闭性。大约 24h 后取回(从容器中取出烧杯时应立即密闭,以防止大气中 CO_2进入溶液中造成误差),取回的液样先用过量的 $BaCl_2$沉淀已吸收 CO_2的 NaOH 溶液,然后以酚酞为指示剂,用 1 mol/L 的标准 HCl 进行滴定中和过量的 NaOH,计算 24 h 内土壤释放 CO_2量。原则上在整个生育期各生育阶段(播种期、出苗期、拔节期、灌浆期和成熟期)分别进行观测,每个小区设 3—5 次重复。根据下式计算 24 h 内土壤呼吸速率:

$$CO_2\text{-C}(mg\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}) = (V_0 - V)\times C_{HCl}\times M/A$$

式中,V_0为滴定对照瓶所需标准盐酸的体积(mL);V 为滴定样品瓶所需标准盐酸的体积(mL);C_{HCl}为标准盐酸溶液浓度(mol/L);M 为碳的摩尔质量(g/mol)转换系数;A 为圆柱形容器的底面积(m^2)。

通过对每个时间段$\triangle t$(天数,即$t_{i+1}-t_i$)测定的土壤呼吸速率平均值($(R_i+R_{i+1})/2$)累加计算并换算(B,单位换算系数)求得全年(生育期+休闲期)土壤呼吸释放通量:

$$CO_2\text{-}C(kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}) = \sum(R_i + R_{i+1})/2\times\triangle t\times B$$

1.3.2　土壤有机质的测定

玉米收获后取样,采用重铬酸钾容量法-外加热法进行测定。方法原理:在外加热油浴 180 ℃的条件下,用一定浓度的重铬酸钾-硫酸溶液氧化土壤中的有机碳,剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁来滴定,从所消耗的重铬酸钾量来计算土壤有机质(SOM)含量。土壤有机质转化为土壤有机碳(SOC)的转换系数为 0.58(即 SOC = SOM×0.58)。

1.3.3　作物产量的测定

在玉米收获期取作物植株样,每个小区随机选 3 垄(不包括保护行)进行取样,每垄取 7 株进行称重,分别测定植株和籽粒干重,然后计算单位面积玉米籽粒和秸秆产量。

1.3.4　试验数据统计分析

为了能够对农田耕作系统能量平衡/碳收支平衡进行定量评价,本研究主要采用 2006—2007 年对应的田间试验数据,包括土壤呼吸测定、土壤有机质和玉米产量等数据进行估算。试验数据采用 SAS[51] 统计软件 GLM 及 REG 程序进行方差分析和回归分析。

2　结果与分析

2.1　不同耕作系统玉米产量

2006—2007 年玉米籽粒产量变化如图 2。2006 年降雨量较少(生育期降水量约 419 mm),玉米籽粒产量变化幅度在 4553—5087 kg/hm²。相对于 CT(4553 kg/hm²),NT 玉米籽粒产量(5087 kg/hm²)显著提高约 12%($P < 0.05$),RT 产量(4696 kg/hm²)增加 3%。2007 年降雨量较丰富(生育期降水量约 529 mm),玉米产量变化幅度在 5979—6531 kg/hm²。与 CT 产量(6420 kg/hm²)比较,RT 产量(6531 kg/hm²)增加约 2%,NT 产量(5979 kg/hm²)减少约 7%,但三者差异不显著($P > 0.05$)。两年平均产量(kg/hm²)为:RT(5614 ±1298) > NT(5533 ± 631) > CT(5487 ± 1320)。相对于 CT,NT 在旱年有明显增产作用;丰水年一般保持平产。

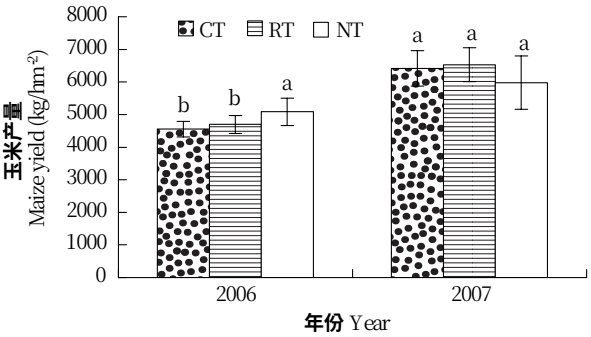


图 2　不同耕作下玉米生育期产量

Fig. 2　Maize grain yields under different tillage systems

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕

2.2　不同耕作系统土壤呼吸估测

农田耕作系统土壤呼吸是由土壤向大气排放 CO_2 的过程,主要包括土壤微生物呼吸和植物根呼吸及土壤动物呼吸。土壤呼吸作用的变化是影响农田系统碳收支平衡要素之一,很大程度影响系统碳平衡估算。本研究采用不同方法对不同耕作系统土壤呼吸进行估测:(1)田间原位测定土壤呼吸;(2)根据土壤有机物分解释放 CO_2-C 量估算;(3)土壤有机碳平衡方程估算 CO_2-C 量;(4)模拟估测土壤呼吸。

2.2.1　田间原位测定土壤呼吸

2006—2007 年在山西寿阳旱农试验区不同耕作/秸秆处理土壤,于玉米生育期-休闲期采用碱吸收滴定法测定土壤呼吸作用强度(mg CO_2-C·m^{-2}·d^{-1})(图 3),并估算土壤-作物系统土壤呼吸作用 CO_2-C 年释放通量(kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})(图 4)。

田间测定结果表明,玉米生长发育高峰期(7—8 月春玉米抽雄-吐丝期)土壤呼吸日通量达到最大,休闲期(11—4 月玉米秋收获后-玉米春播期间)土壤呼吸降至最低(图 3)。2006 和 2007 年不同耕作处理玉米生育期土壤呼吸日通量(mg CO_2-C·m^{-2}·d^{-1})变化幅度分别为:385—1176 和 414—1300(RT);287—1385 和

271—1525(NT);280—1279 和 292—1264(CT)。在玉米休闲期(尤其是秋耕处理后),NT 土壤呼吸速率为最低,而玉米生育期,尤其在玉米生长高峰期,NT 土壤呼吸速率为最高,如 2006—2007 年 3 种耕作下生长高峰期土壤呼吸速率(mg CO_2-C·m^{-2}·d^{-1})分别为:1385—1525(NT),1176—1300(RT)和 1279—1264(CT)。

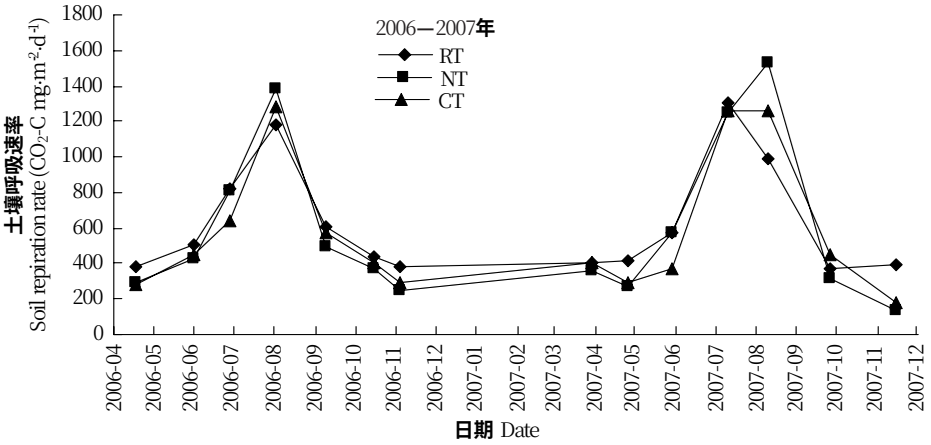


图 3 碱吸收法测定农田不同耕作系统土壤呼吸日变化通量

Fig. 3 Changes in soil respiration rates in maize field under different tillage systems measured by liquid alkali absorb method

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕

2006—2007 年不同耕作处理土壤呼吸年释放通量(kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})比较(图 4),玉米休闲期平均为:NT(540±30)<CT(619±20)<RT(873±137),NT 较 CT 降低约 13%,这与玉米收获后 NT 土壤不翻动而减少了土壤呼吸作用有关;玉米生育期平均为:CT(1368±355)<RT(1468±387)和 NT(1465±410),RT 和 NT 较 CT 提高约 7%,这可能与少免耕土壤中秸秆还田/覆盖可提供微生物/作物生长所需能源/养分,同时促进土壤微生物和根系的呼吸作用有关。全年土壤呼吸总量(kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})平均为:RT(2342±524)>NT(2005±380)>CT(1987±375),RT 处理较 CT 提高约 18%。

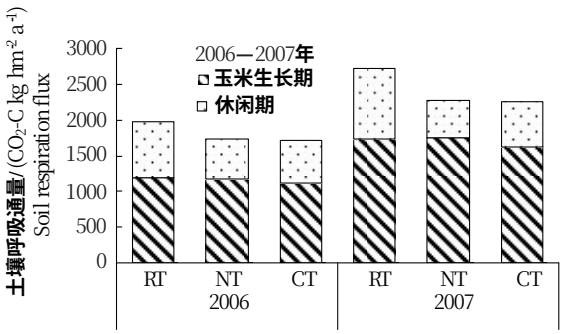


图 4 农田不同耕作系统土壤呼吸年释放通量

Fig. 4 Changes in soil respiration flux in maize field under different tillage systems measured by liquid alkali absorb method

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕

由研究结果发现,不同耕作下的玉米籽粒产量与生育期土壤呼吸通量趋势基本吻合(图 5),如 2006—2007 年玉米产量(kg·hm^{-2}·a^{-1})平均为,RT(5614±268) >NT(5533±564) >CT(5487±278)。玉米籽粒产量与生育期土壤呼吸通量之间呈密切相关(R^2=0.88),但与休闲期土壤呼吸通量之间相关性不大。与 CT 相比,RT 处理因玉米收获后秸秆直接还田,增加了土壤有机物投入,导致土壤呼吸作用相对较高,作物生长和产量也相对较高,这可能在于增加有机物料促进了土壤微生物活性和有机物的分解,且改善了作物养分吸收。

2.2.2 土壤有机物分解释放 CO_2-C 量估算

根据 2006—2007 年测定不同耕作/残茬处理的土壤有机质变化和作物产量数据,及有机物(如秸秆、牛粪、根茬和有机质)分解系数(表 1),可以估算得出每年秸秆和残茬还田土壤有机物分解释放 CO_2-C 量(表 2)。比较不同耕作措施对土壤呼吸(kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})的影响为,RT(3565)>NT(3508)>CT(2215),其估算值与田间测定结果趋势一致,但估测结果略高于田间测定结果。这是否与估算中涉及土壤有机碳分解项的取值深度(20 cm)有关,还有待进一步验证。

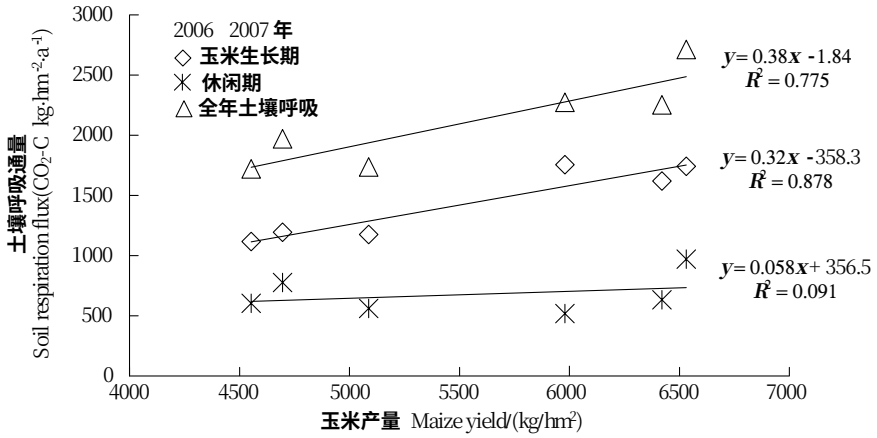


图 5　不同耕作系统玉米产量与土壤呼吸年释放通量

Fig. 5　The relationships between maize grain yields and soil respiration flux

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕

表 2　不同耕作系统年碳投入量、土壤有机质与有机物分解释放 CO_2-C 量估算（2006—2007 年）

Table 2　Carbon input, soil organic matter (SOM), andCO_2 respiration from organic material decomposition estimated by using the decay coefficients of organic materials [48]

试验年 Year	处理 Treatment	碳投入量 C input /(kg·hm^{-2}·a^{-1}) 秸秆 Stover	根茬 Stubble + roots	土壤有机质 SOM /(g/kg)	有机物分解释放 CO_2-C respiration from decomposition /(kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})	玉米产量 Grain yield /(kg/hm^2)
2006	RT	1860	827	29.9	3108	4696b±278
	NT	2014	895	28.8	3226	5087a±418
	CT	501	801	30.0	2011	4553b±239
2007	RT	2586	1149	33.9	4023	6531a±524
	NT	2368	1052	33.7	3786	5979a±815
	CT	706	1130	31.5	2414	6420a±542
平均	RT	2223	988	31.9	3565	5614a±268
	NT	2191	974	31.3	3508	5533a±564
	CT	604	966	30.8	2215	5487a±278

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕; 分解系数 k 见表 1

2.2.3　土壤有机碳平衡方程估算 CO_2-C 量

基于寿阳玉米地少耕秸秆还田长期定位试验,并结合应用碳循环模型(Century 模型)模拟预测耕作系统土壤有机碳动态变化(图 6)。由田间试验测定和模拟分析得到土壤有机碳平衡方程[49]如下:SOC(tC·hm^{-2}·a^{-1})= 0.1566x-0.1987。由此关系式可推知,维持土壤有机碳平衡的年均残茬投入量(x)至少在 50%(相当于 1.3 t C),表明秸秆还田增加土壤碳投入是维持和提高土壤有机碳的有效途径。由方程估算不同耕作措施对土壤碳汇/源影响为:长期采用 CT 会导致土壤有机碳逐年损失(-104 kgC·hm^{-2}·a^{-1});而实施 RT 和 NT 措施土壤有机碳呈逐年递增趋势(144—149kgC·hm^{-2}·a^{-1})(表 3)。由此土壤有机碳平衡方程也可估算土壤呼吸 CO_2-C 释放量:每年因呼吸导致的碳释放量(tC·hm^{-2}·a^{-1})=(1- 0.1566)x-0.1987。比较不同耕作措施对土壤呼吸的影响,此方程估算结果与田间测定结果基本吻合。不同耕作处理土壤呼吸估测值为:RT(2074kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})>NT(2047kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})>CT(708kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})(表 3),但 CT 估算值有些偏低。这与本关系式是在长期少耕秸秆还田(并配施化肥)试验基础上建立而得,所以较适用于预测秸秆碳投入量对土壤有机碳分解或固定的影响。

2.2.4　模拟估测土壤呼吸

应用 Century 模型[50],模拟长期不同耕作能量/碳管理土壤-作物系统土壤呼吸 CO_2-C 释放量。模拟估算

值与田间测定的不同耕作措施对土壤呼吸的影响趋势基本一致(图 7)。由模拟估算的土壤呼吸年通量为:CT(2478kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1}) < NT(3316kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1}) < RT(3988kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1}),但模拟值一般较田间测定估算值偏高。由于土壤呼吸过程受环境影响很大,取样时期和测定方法都可能导致实验误差。

表 3 用土壤有机碳平衡方程估算土壤呼吸及土壤碳平衡(2006—2007 年平均值)

Table 3 Soil respiration CO_2-C emissions and carbon balances (averaged over 2006—2007) **estimated by using the equation of soil organic balance**[49]

土壤呼吸及碳汇/源 CO_2-C sink/source	CT	NT	RT
碳投入量 C input (kg C·hm^{-2}·a^{-1})	1570	3165	3211
土壤呼吸 Soil respiration (kg CO_2-C·hm^{-2}·a^{-1})	708	2047	2074
土壤碳汇/源 Soil C balance (kg C·hm^{-2}·a^{-1}) (+/-)	-104	144	149

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕; 有机碳平衡方程式见图 6

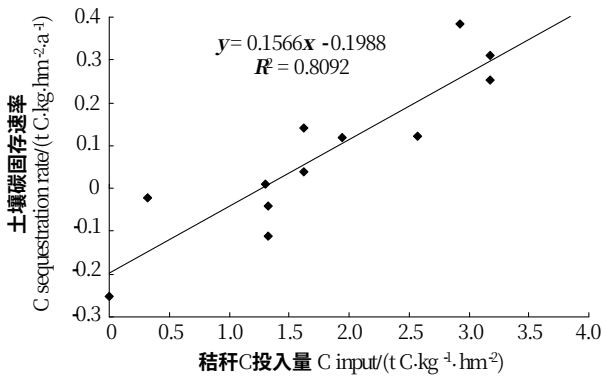


图 6 每年有机物料(秸秆 C)投入对土壤碳年变化速率的影响[49]

Fig. 6 Relationship between annual C inputs (from stover C return) to soil and the rate of C sequestration in the top 20 cm layer[49]

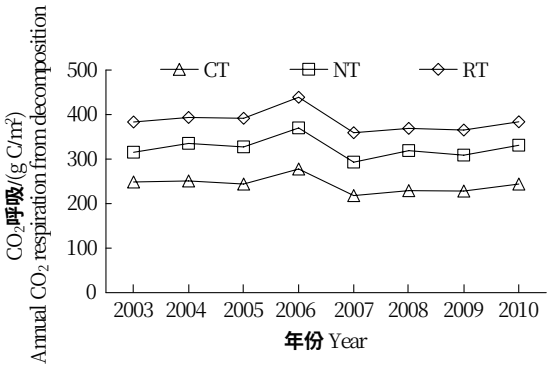


图 7 Century 模型[50]**模拟预测不同耕作系统残茬分解过程土壤呼吸 CO_2-C 量年变化**

Fig. 7 Simulation of annual CO_2 respiration from decomposition under different tillage systems using Century model[50]

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕

2.3 农田耕作系统能流(量)-碳流平衡分析

通过对试验区相关基础资料、试验数据、能流和碳流分析、模型模拟所需数据收集和调研,获取当地农田耕作系统人工辅助能量,包括工业能源和生物能投入有关参数,用于估算与能耗有关的 CO_2-C 排放能量,估测和比较了不同耕作管理系统能投、能量输出、能量转化利用效率、农业辅助能产投比等,估算分析了耕作系统能流(量)输入与输出平衡,及土壤-作物-大气碳循环过程主要碳收支项平衡。

2.3.1 农田耕作系统能投参数调研估测

对试验区相关基础资料、田间试验数据、能流和碳流数据调研分析、获取当地农田耕作系统人工辅助能量,包括工业能源和生物能投入有关参数,并对不同耕作系统主要能投参数及与能耗有关的 CO_2-C 排放能量进行估测(表 4)。采取不同耕作措施的能量投入 为:CT(13829MJ/hm^2) >RT(13289MJ/hm^2) >NT(12434MJ/hm^2);相当于碳排放量为:CT(283kg C/hm^2) >RT(272kg C/hm^2) >NT(248kg C/hm^2)。与 CT 比较,RT 和 NT 措施下的能量投入降低了 4%—12%;能耗(以 CO_2-C 排放能量计)降低了 11—35 kg CO_2-C/hm^2。表中还可看出,化肥投入能耗在系统总能量投入中约占 80%—90%,CT 耕作机械能耗投入约占总能投的 12%,而 NT 和 RT 各约占 3% 和 9%。

表 4　不同耕作系统主要能投参数及碳排放量估测(2006—2007 年平均值)

Table 4　The parameters related to energy inputs and the estimated CO_2-C emissions due to energy consumpsion (averaged over 2006—2007)

能量投入项 Energy input	CT 能流 Energy /(MJ/hm²)	CT 碳流 Carbon /(kgC/hm²)	NT 能流 Energy /(MJ/hm²)	NT 碳流 Carbon /(kgC/hm²)	RT 能流 Energy /(MJ/hm²)	RT 碳流 Carbon /(kgC/hm²)
人工 Labour	701	14	350	7.2	701	14
化肥 Fertilization	10952	224	10952	224	10952	224
春旋耕 Rotary harrowing	540	11	0	0	0	0
机播 Planting	338	7	338	6.9	338	7
种子 Seed	489	10	489	10	489	10
除草剂 Herbicide	0	0	306	6.3	0	0
翻地 Ploughing	810	17	0	0	810	17
能量投入 Total energy input	13829	283	12434	248	13289	272

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕

2.3.2　农田耕作系统能量平衡分析

对不同耕作管理系统能量平衡分析,包括对能量投入、能量输出、能量转化利用效率、农业辅助能产投比等估测和比较结果如表 5 所示。不同耕作系统的总能量输出(籽粒+秸秆)为为:RT(173462MJ/hm²) >NT(170957MJ/hm²) >CT(169540MJ/hm²)。耗能系数为:NT(2.25GJ/t 籽粒) < RT(2.37GJ/t 籽粒) < CT(2.52GJ/t 籽粒);籽粒能量产投比(籽粒能输/能投)为:NT(7.3) > RT(6.9) > CT(6.5);能量生产效率为:NT(0.44t 籽粒/GJ) > RT(0.42t 籽粒/GJ) > CT(0.40t 籽粒/GJ)。与 CT 比较,RT 和 NT 措施下的耗能系数降低约 6%—10%,能量生产效率提高约 7%—12%。

表 5　不同耕作系统能量输入与输出及其转化利用效率分析(2006—2007 年平均值)

Table 5　Energy balance analysis based on energy input amd output, and energy productivity under different tillage systems (averaged over 2006—2007)

能量输入与输出各项 Energy input and output	CT	NT	RT
能量投入 Energy input (MJ/hm²)	13829	12434	13289
能量投入排放量 Emissions (kg CO_2-C/hm²)	283	248	272
籽粒产量 Grain yield (kg/hm²)	5487	5533	5614
能量输出(籽粒产量) Energy output (grain yield) (MJ/hm²)	89434	90181	91502
能量输出(秸秆产量) Energy output (stover yield) (MJ/hm²)	80106	80776	81959
总能量输出(籽粒+秸秆) Total energy output (MJ/hm²)	169540	170957	173462
净能量输出(总能输-能投) Net energy output (MJ/hm²)	155711	158523	160173
能量产投比(总能输/能投) Enery output/input	12.3	13.7	13.1
籽粒能量产投比(籽粒能输/能投) Grain energy output/input	6.5	7.3	6.9
能量生产效率 Energy productivity (t 籽粒/GJ)	0.40	0.44	0.42
能量消耗强度 Energy intensity (GJ/t 籽粒)	2.52	2.25	2.37

CT: 传统耕翻; NT: 免耕; RT: 秸秆翻压还田少耕

2.3.3　农田耕作系统碳平衡分析

土壤-作物-大气碳循环过程主要碳收支项平衡分析见表6。与 CT 比较,采取保护性耕作(RT 和 NT)措施因增加了秸秆还田碳投入量及根茬生物量约 1.6 tC/hm²,减少了秸秆焚烧/丢弃碳损失量约 1.6 tC/hm²,并降低了能耗 CO_2-C 损失量约 11—35 kg CO_2-C/hm²,降低了土壤侵蚀流失碳量 1.2—1.6 tC/hm²。NT 和 RT 处理的土壤呼吸 CO_2-C 释放量均大于 CT 处理。由田间原位测定土壤呼吸估算结果可知,土壤呼吸 CO_2-C 损失量在系统碳源项估算中占有很大比重(约占 33%—69%),如对于 NT 和 RT 而言,土壤呼吸损失对碳源项贡献各占约 69% 和 64%;而对 CT 而言,由土壤呼吸损失、秸秆焚烧/丢弃、能量投入排放和土壤碳流失对碳源项的

影响份额分别约占33%、30%、5%和33%。由表6分析可知,通过改变土壤耕作措施(如采取RT和NT),可减少因农机械能耗(4%—12%)、秸秆焚烧(约87%)和水土流失引起的碳排放(约60%—80%);通过实施RT和NT并秸秆还田措施,相对提高了作物生育期土壤呼吸速率(约7%,图4),同时作物产量(图5)和土壤有机质含量(表2)也有所改善。

尽管不同方法估算的土壤呼吸 CO_2-C 损失量有些差异,然而,系统碳汇/源分析所得结果基本一致(表6),如CT处理均表现为碳源;NT/RT处理表现为碳汇。可见,农田耕作系统高能投入或高能耗(如CT)可导致系统为碳源,而降低能投或能耗(如NT/RT)则导致系统为碳汇。可以看出,尽管NT与RT系统下碳产量和土壤碳汇基本相近,但NT系统碳汇作用优于RT。其差异主要在于NT条件下机械能耗投入较少(如NT和RT耕作能投各约占总能投的3%和9%,表4),其能投排放量,特别是土壤侵蚀导致碳损失量明显降低(表6),而且NT土壤因未受扰动其土壤呼吸作用一般较RT土壤为低。可见,从NT少投节能和保护土壤免遭侵蚀、维持和增加土壤有机碳水平和作物产量,以通过提高能量生产效率(NT和RT各为12%和7%)来提高农田系统土壤固碳减排净效应而论,NT较RT更胜一筹。

表6 不同耕作系统碳平衡分析(2006—2007年平均值)

Table 6 Carbon balance analysis under different tillage systems (averaged over 2006—2007)

系统碳汇/源各项 Carbon sink /source	CT	NT	RT
籽粒C产量 Grain C yields (kgC/hm^2)	+2414	+2434	+2470
秸秆C/根茬C还田量 C input by stover return (kgC/hm^2)	+1570	+3165	+3211
烧/丢弃秸秆C损失量 C losses by stover removal (kgC/hm^2)	-1811	-243	-247
能量投入排放 CO_2-C量 Emissions by energy input (kgC/hm^2)	-283	-248	-272
测定估算土壤侵蚀流失C量 Soil C losses by erosion (kgC/hm^2)	-2036	-431	-828
1)田间测定估算土壤呼吸 Soil respiration measured (kg CO_2-C/hm^2)	-1987	-2005	-2342
2)有机物分解系数估算土壤呼吸 Soil respiration estimated (kg CO_2-C/hm^2)	-2215	-3508	-3565
3)模拟土壤呼吸释放量 Soil respiration simulated (kg CO_2-C/hm^2)	-2478	-3316	-3988
4)有机碳平衡方程估算土壤呼吸 Soil respiration equated (kg CO_2-C/hm^2)	-708	-2047	-2074
由1)估算农田系统C汇/源 Syetem C sink/source (kgC/hm^2)(+/-)	-2133	2672	1993
由2)估算农田系统C汇/源 Syetem C sink/source (kgC/hm^2)(+/-)	-2361	1169	769
由3)估算农田系统C汇/源 Syetem C sink/source (kgC/hm^2)(+/-)	-2624	1361	346
由4)估算农田系统C汇/源 Syetem C sink/source (kgC/hm^2)(+/-)	-854	2630	2260
由4)估算土壤碳汇/源 Soil C sink/source (kgC/hm^2)(+/-)	-104	144	149

CT:传统耕翻;NT:免耕;RT:秸秆翻压还田少耕;系统碳汇用+号表示,系统碳源用-号表示

3 讨论与结论

3.1 不同耕作措施对农田系统碳汇/源的影响

Yu等[52]估算,中国耕地土壤有机碳损失速率(1990年代与未耕作土壤相比)高达60%—80%。除了受外界因素(气候、土壤条件等)影响外,土壤耕作通过增加系统生产能耗(或增加温室气体排放)和对土壤碳循环的影响,直接或间接地加速系统碳损失或影响碳汇增加。耕作方法的改变如从传统耕翻转向保持耕作技术,可通过提高土壤有机碳和节省能耗来实现增加土壤碳库或抵消土壤碳损耗(减少 CO_2 排放)[53]。欧洲和北美洲地区的研究显示,通过采用土壤保持耕作(如农地采取少免耕)措施来降低土壤有机碳损失,对补偿或恢复土壤损失的碳具有很大潜力[5];免耕对温室效应降排潜力只有长期实施免耕措施以后(>10a以至>20a)才能显现[54]。本研究结果表明,与CT比较,采取保护性耕作措施因增加了秸秆还田碳投入量及根茬生物量,减少了秸秆烧/弃碳损失及土壤侵蚀流失碳量,并降低了工业能耗 CO_2-C 损失(约4%—12%),因此,RT和NT对农田耕作系统的影响呈碳汇效应。尽管不同方法估算的土壤呼吸 CO_2-C 损失量有些差异,然而,系统碳汇/源分析所得结果是一致的,如CT处理均表现为碳源;RT和NT处理均表现为碳汇,且一般为NT>RT。而且,研究表明秸秆还田少免耕通过增加土壤碳投入是维持和提高土壤有机碳的有效途径。

3.2　不同耕作措施对农田系统能量/碳平衡的影响

土壤耕作过程以及耕作管理系统物质能量投入对温室气体的贡献和土壤有机碳的影响是不可忽视的。国外有学者建议对农业系统净碳损失通量的评价若不考虑能耗引起的 CO_2 向大气的排放通量则是不完全的,尤其不能忽略氮肥作为农业生产最大能耗投入对 CO_2 排放的影响[55]。每年农业生产过程包括耕作、施肥、农药、灌溉等投入可成为重要的温室气体排放"源",以化肥投入为例,化肥投入在我国农业生产中占很大比重[56];据估计我国化肥投入成本约占年作物生产总投入材料成本的 50%[57]。本研究根据试验区旱地农田系统能量/碳输入估算,化肥投入在系统总能投中约占 80%—90%,CT 耕作机械能耗投入约占总能投的 12%(NT 和 RT 各约占 3% 和 9%)。显然,通过对农田耕作系统能/碳平衡综合分析可以看出,免耕系统虽减少了耕作环节却增加了农药等需求,免耕施肥的短期增产效应不一定优于传统耕作系统,然而,免耕系统下却可能用少投、节能和减少土壤扰动来降排温室气体、控制水土流失、维持和增加土壤有机碳、以及长期增产潜力和环保效应作为补偿,以通过提高能量生产效率来提高农田系统土壤固碳减排净效应。本研究表明,与 CT 比较,RT 和 NT 系统的耗能系数可降低 6%—10%,能量生产效率可提高 7%—12%。

3.3　不同耕作措施对农田系统土壤呼吸的影响

2006—2007 年由田间原位测定土壤呼吸,不同耕作处理土壤呼吸年释放通量比较,在玉米休闲期,NT 土壤呼吸通量较 CT 降低约 13%,这显然与玉米收获后 NT 土壤不翻动而减少土壤呼吸作用有关。玉米生育期,RT 和 NT 土壤呼吸通量较 CT 提高约 7%,这在于 RT 和 NT 秸秆还田/覆盖土壤中有较充足的能源和养分供应,促进了土壤微生物和根系的呼吸作用。不同耕作下的玉米籽粒产量与生育期土壤呼吸通量趋势基本吻合($R^2=0.88$),二者均为:RT >NT >CT。也就是说 RT 和 NT 措施下,在土壤维系一定 C 投入同时合理配施 N 肥,不仅促进了土壤微生物活性和有机物的分解,增强了生育期土壤呼吸作用,同时也提高了土壤有效养分供应,改善了根系生长和养分吸收,以及地上和地下部生物量积累。有研究同样指出,当有机物料加入到土壤中时,土壤呼吸速率会增大[58],如王燕[59]测定了山西寿阳旱地不同养分管理模式下玉米地土壤呼吸通量为:秸秆还田 >牛粪 >化肥 >CK。Li 等[60]对东北黑土长期施肥下耕地土壤呼吸通量观测也有类似结果:有机肥 > NPK 化肥 >CK。显然,由于少免耕系统土壤投入大量秸秆碳,促使土壤微生物作用加强,从而影响土壤有机物分解和土壤呼吸 CO_2-C 释放过程,并影响土壤有机碳平衡。由前分析,少免耕系统土壤呼吸通量增加可以通过减少其他方面碳损失(如工业能耗碳损失,秸秆移出碳丢失,土壤侵蚀碳流失等)而得以补偿,最终系统碳平衡结果为碳汇。

其他土壤呼吸估测方法(如根据土壤有机物分解释放 CO_2-C 量估算,基于土壤有机碳平衡方程估算,或应用模型模拟估测等)均与田间原位测定结果有同样趋势,即 RT >NT >CT。由田间原位测定估算可知,土壤呼吸 CO_2-C 损失量在系统碳源项估算中占有很大比重(约 33%—69%),由于土壤呼吸过程受环境影响很大,取样时期和测定方法都可能导致实验误差,显然,土壤呼吸 CO_2-C 损失量估算误差影响到农田系统碳收支平衡估算。因此,土壤呼吸日变化过程及其年动态变化的田间观测,相关环境因素影响,以及不同测定估算方法的差异都还有待进一步分析验证和校正,以减少土壤呼吸损失量估算的不确定性。

3.4　结论

本研究结果得出,RT 和 NT 对农田耕作系统的影响呈碳汇效应,且一般为 NT >RT;而 CT 处理表现为碳源。RT 和 NT 通过增加土壤碳投入是维持和提高土壤有机碳的有效途径。与 CT 比较,RT 和 NT 系统可通过降低耗能系数(6%—10%)或提高能量生产效率(75%—12%)来提高农田系统土壤固碳减排净效应。不同耕作措施下的玉米籽粒产量与生育期土壤呼吸通量趋势基本吻合($R^2=0.88$),二者均为:RT >NT >CT;而玉米休闲期 NT 土壤呼吸通量较 CT 降低约 13%。土壤呼吸估算误差影响到农田系统碳收支平衡估算,其测定/估算方法有待进一步验证和校正,以减少土壤呼吸估算的不确定性。

References:

[1] Lal R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO_2-enrichment. Soil and Tillage

Research, 1997, 43(1/2): 81-107.

[2] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 353-362.

[3] Lal R. Agricultural activities and the global carbon cycle. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 70(2): 103-116.

[4] FAO. Conservationagriculture. When agriculture is profitable and sustainable (CD-ROM)//FAO Land and Water Digital Media Series 18. Rome: FAO, 2002. ISBN 9789250051048.

[5] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential inEurope and the global context. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 229-236.

[6] Hadas A, Wolf D, Stibbe E. Tillage practices and crop response-analyses of agro-ecosystems. Agro-Ecosystems, 1980, 6(3): 235-248.

[7] Stinner BR, Odum EP, Crossley DA Jr. Nutrient uptake by vegetation in relation to other ecosystem processes in conventional tillage, no-tillage and old-field systems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1983, 10(1): 1-13.

[8] Fluck R C. Energy productivity: A measure of energy utilisation in agricultural systems. Agricultural Systems, 1979, 4(1): 29-37.

[9] Fluck R C. Energy in World Agriculture Series, V6. Energy in Farm Production. Amsterdam: Elsevier, 1992: 45-51.

[10] Panesar B S, Fluck R C. Energy productivity of a production system: analysis and measurement. Agricultural Systems, 1993, 43(4): 415-437.

[11] Clements D R, Weise S F, Brown R, Stonehouse D P, Hume D J, Swanton C J. Energy analysis of tillage and herbicide inputs in alternative weed management systems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1995, 52(2/3): 119-128.

[12] Franzluebbers A J, Francis C A. Energy output: input ratio of maize and sorghum management systems in eastern Nebraska. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1995, 53(3): 271-278.

[13] Borin M, Menini C, Sartori L. Effects of tillage systems on energy and carbon balance in north-eastern Italy. Soil and Tillage Research, 1997, 40(3/4): 209-226.

[14] Uri N D, Atwood J D, Sanabria J. The environmental benefits and costs of conservation tillage. The Science of the Total Environment, 1998, 216(1/2): 13-32.

[15] Janzen H H, Campbell C A, Izaurralde R C, Ellert B H, Juma N, Mcgill W B, Zentner R P. Management effects on soil c storage on the Canadian prairies. Soil Tillage Research, 1998, 47(3/4): 181-195.

[16] Ellert B H, Janzen H H. Short-term influence of tillage on CO_2 fluxes from a semi-arid soil on the Canadian prairies. Soil and Tillage Research, 1999, 50(1): 21-32.

[17] Watts C W, Eich S, Dexter A R. Effects of mechanical energy inputs on soil respiration at the aggregate and field scales. Soil Tillage Research, 2000, 53(3/4): 231-243.

[18] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 91(1/3): 217-232.

[19] Coleman K, Jenkinson D S, Crocker G J, Grace P R, Klír J, Körschens M, Poulton P R, Richter D D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. Geoderma, 1997, 81(1/2): 29-44.

[20] Li C S, Frolking S, Crocker GJ, Grace P R, Klír J, Körchens M, Poulton P R. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model. Geoderma, 1997, 81(1/2): 45-60.

[21] Kelly R H, Parton W J, Crocker G J, Grace P R, Klír J, Körschens M, Poulton P R, Richter D D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the century model. Geoderma, 1997, 81(1/2): 75-90.

[22] Smith P, Smith J U, Powlson D S, McGill W B, Arah J R M, Chertov O G, Coleman K, Franko U, Frolking S, Jenkinson D S, Jensen L S, Kelly R H, Klein-Gunnewiek H, Komarov A S, Li C, Molina J A E, Mueller T, Parton W J, Thornley J H M, Whitmore A P. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using data sets from seven long-term experiments. Geoderma, 1997, 81(1/2): 153-225.

[23] Fernandes E C M, Motavalli P P, Castilla C, Mukurumbira L. Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems. Geoderma, 1997, 79(1/4): 49-67.

[24] Leite L F C, de Sá Mendonça E, de Almeida Machado P L O, Filho E I F, Neves J C L. Simulating trends in soil organic carbon of an acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the century model. Geoderma, 2003, 120(3/4): 283-295.

[25] Hill M J. Generating generic response signals for scenario calculation of management effects on carbon sequestration in agriculture: approximation of main effects using CENTURY. Environmental Modelling & Software, 2003, 18(10): 899-913.

[26] Asseng S, Jamieson P D, Kimball B, Pinter P, Sayre K, Bowden J W, Howden S M. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO_2. Field Crops Research, 2004, 85(2/3): 85-102.

[27] Wang Y X, Zhao S D. Modeling of terrestrial carbon cycling. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 658-664.

[28] Luo S M. Research directions of agricultural ecology in recent years. World Sci-Tech Research and Development, 2000, 22(10): 42-44.

[29] Yu Q, Wang T D. Agricultural ecosystem model and high efficient utilization of resources. World Sci-Tech Research and Development, 2001, 23

(5): 22-27.

[30] Li C S. Loss of soil carbon threatens Chineseagriculture: a comparison on agroecosystem carbon pool in China and the U. S. Quaternary Sciences, 2000, 20(4): 345-350.

[31] Liu Y F, Ouyang H, Zhang X Z, Zhong H P, Luo T X. Carbon balance in agro-ecosystem in Qinghai Tibet plateau. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(5): 636-642.

[32] Wang L G, Qiu J J, Li W J. Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer corn in Huanghuaihai region in China. Soils and Fertilizers, 2002, (6): 13-17.

[33] Wang L G, Qiu J J. Study on the simulation of soil carbon and nitrogen cycle in agro ecosystem in high yields area — a case study of Quzhou county Hebei Province. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(Suppl): 31-35.

[34] Wu J S, Tong C L, Liu S L. Responses of soil organic carbon to global climate changes in cultivated soils in the subtropical and the Loess Plateau regions. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(1): 131-137.

[35] Yang X M, Zhang X P, Fang H J. Importance of agricultural soil sequestering carbon to offsetting global warming. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(1): 101-106.

[36] Wei Y M, Fan Y, Wang Y, Liu C L, Liang Q M, Wu G, Cao M K, Huang Y, Wang S Q. Suggestions andsolutions to carbon emissions in China. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 15-20.

[37] Wang L F. Agroecology. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1994.

[38] Luo S M, Chen Y H. Agroecology. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1987.

[39] Wen D Z. Energetics study of the agroecosystems in Northeastern China. Chinese Journal of Ecology, 1986, 5(4): 1-5.

[40] Yin J, Gao Z Q, Zhang B L, Zhang Y Y. A study of the energy conversion system in farming. Journal of Shanxi Agricultural University, 1998, 18(2): 95-98.

[41] Wen D Z. The study method of energy flow in agro-ecosystem. Rural Eco-Environment, 1985, (4): 47-52.

[42] Han C R. Agricultural structure and efficiency in agro-ecosystem. Rural Eco-Environment, 1985, (3): 6-8.

[43] Li L L, Huang Y Z, Han C R. Study on conversion coefficient of industrial energy inputs in agro-ecosystem. Rural Eco-Environment, 1989, (4): 32-36.

[44] Wang X B, Oenema O, Hoogmoed W B, Perdok U D, Cai D X. Dust storm erosion and its impact on soil carbon and nitrogen losses in northern China. Catena, 2006, 66(3): 221-227.

[45] Janzen H H, Campbell C A, Izaurralde R C, Ellert B H, Juma N, Mcgill W B, Zentner R P. Management effects on soil c storage on the Canadian prairies. Soil Tillage Research, 1998, 47(3/4): 181-195.

[46] Xu G H, Zheng H Y. AnalysisHandbook of Soil Microorganism. Beijing: China Agriculture Press, 1986.

[47] Cai D X. Maintenance of soil organic matter balance in the farmland of dryland//Leng S L, Han S F, eds. The Theory and Technology of Water-Saving and Yield Increasing for Dryland Crop in North China. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1996: 210-217.

[48] Wang X B, Hoogmoed W B, Cai D X, Perdok U D, Oenema O. Crop residue, manure and fertilizer in dryland maize under reduced tillage in northern China: II nutrient balances and soil fertility. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79(1): 17-34.

[49] Wang X B, Cai D X, Hoogmoed W B, Oenema O, Perdok U D. Scenario analysis of tillage, residue and fertilization management effects on soil organic carbon dynamics. Pedosphere, 2005, 15(4): 473-483.

[50] Parton W J. The CENTURY model//Powlson D S, Smith P, Smith J U, eds. Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets. NATO ASI Series I. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 283-293.

[51] SAS Institute Inc. SAS® 9.1.2 Qualification Tools User's Guide. Cary NC: SAS Institute Inc, 2004.

[52] Yu Y Y, Guo Z T, Wu H B, Kahmann J A, Oldfield F. Spatial changes in soil organic carbon density and storage of cultivated soils in China from 1980 to 2000. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23: GB2021, doi:10.1029/2008GB003428.

[53] Kern J S, Johnson M G. Study projects conversion to year 2020 and accompanying reductions in soil organic carbon and fossil fuel emissions. Past Fluid Journal, 1993,1(3): 11-13.

[54] Six J, Ogle S M, Breidt F J, Conant R T, Mosier A R, Paustian K. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. Global Change Biology, 2004, 10(2): 155-160.

[55] Janzen H H, Campbell C A, Izaurralde R C, Ellert B H, Juma N, Mcgill W B, Zentner R P. Management effects on soil c storage on the Canadian prairies. Soil Tillage Research, 1998, 47(3/4): 181-195.

[56] Lin B. Chemical Fertilizer and Pollution-free Agriculture. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2003.

[57] Lin B, Li J K, Jin J Y. Outlook on fertilizer use inChina in next century//CAAM. Research Progress in Plant Protection and Plant Nutrition. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 345-351.

[58] Li Y N, Wang G Y, Li W. Soilrespiration and carbon cycle. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 351-357.

[59] Wang Y. Effects ofNutrient Management and Tillage Practices on Soil Carbon Change in Dryland Agroecosystom 。Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.

[60] Li H B, Han X Z, Qiao Y F, Hou X Y, Xing B S. Carbondioxide emission from black soil as influenced by land-use change and long-term fertilization. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40(7/8): 1350-1368.

参考文献:

[27] 汪业勖, 赵士洞. 陆地碳循环研究中的模型方法. 应用生态学报, 1998, 9(6): 658-664.

[28] 骆世明. 农业生态学近年研究动向. 世界科技研究与发展, 2000, 22(10): 42-44.

[29] 于强, 王天铎. 农田生态系统模型与农业资源高效利用. 世界科技研究与发展, 2001, 23(5): 22-27.

[30] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究. 第四纪研究, 2000, 20(4): 345-350.

[31] 刘允芬, 欧阳华, 张宪洲, 钟华平, 罗天祥. 青藏高原农田生态系统碳平衡. 土壤学报, 2002, 39(5): 636-642.

[32] 王立刚, 邱建军, 李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究. 土壤肥料, 2002, (6): 13-17.

[33] 王立刚, 邱建军. 高产粮区农业生态系统土壤碳氮循环的模拟研究——以河北省曲周县为例. 中国农业大学学报, 2003, 8(增刊1): 31-35.

[34] 吴金水, 童成立, 刘守龙. 亚热带和黄土高原区耕作土壤有机碳对全球气候变化的响应地球科学进展. 地球科学进展, 2004, 19(1): 131-137.

[35] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义. 地理科学, 2003, 23(1): 101-106.

[36] 魏一鸣, 范英, 王毅, 刘兰翠, 梁巧梅, 吴刚, 曹明奎, 黄耀, 王绍强. 关于我国碳排放问题的若干对策与建议. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 15-20.

[37] 王留芳. 农业生态学. 西安: 陕西科技出版社, 1994.

[38] 骆世明, 陈聿华. 农业生态学. 长沙: 湖南科技出版社, 1987.

[39] 闻大中. 我国东北地区农业生态系统的力能学研究. 生态学杂志, 1986, 5(4): 1-5.

[40] 尹钧, 高志强, 张布雷, 郑月英. 农田能量测算原理与指标体系的研究. 山西农业大学学报, 1998, 18(2): 95-98.

[41] 闻大中. 农业生态系统能流的研究方法. 农村生态环境, 1985, (4): 47-52.

[42] 韩纯儒. 农业生态系统的农业结构与效率. 农村生态环境, 1985, (3): 6-8.

[43] 李连禄, 黄育珠, 韩纯儒. 农业生态系统工业能投的折算系数探讨. 农村生态环境, 1989, (4): 32-36.

[46] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 中国农业出版社, 1986.

[47] 蔡典雄. 保持旱地农田的土壤有机质平衡//冷石林, 韩仕峰. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1996: 210-217.

[56] 林葆. 化肥与无公害农业. 北京:中国农业出版社, 2003: 1-8.

[58] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. 地学前缘, 2002, 9(2): 351-357.

[59] 王燕. 养分管理与耕作措施对旱地土壤碳消长过程影响的研究. 北京: 中国农业科学院, 2008.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 16 August, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

Discussion

Scientific Note

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

（源于 2010 年版 CSTPCD 数据库）

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	**生态学报**	**11764**	1	**生态学报**	**1.812**
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次，**全国排名第 1**；影响因子 1.812，**全国排名第 14**；第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊；中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅　　**执行编辑** 刘天星　段　靖

生　态　学　报
（SHENGTAI　XUEBAO）
（半月刊　1981 年 3 月创刊）
第 31 卷　第 16 期　（2011 年 8 月）

ACTA ECOLOGICA SINICA
（Semimonthly，Started in 1981）
Vol. 31　No. 16　2011

编　辑　《生态学报》编辑部
地址：北京海淀区双清路 18 号
邮政编码：100085
电话：（010）62941099
www. ecologica. cn
shengtaixuebao@ rcees. ac. cn
主　编　冯宗炜
主　管　中国科学技术协会
主　办　中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址：北京海淀区双清路 18 号
邮政编码：100085
出　版　科学出版社
地址：北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
印　刷　北京北林印刷厂
发　行　科学出版社
地址：东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
电话：（010）64034563
E-mail：journal@ cspg. net
订　购　全国各地邮局
国外发行　中国国际图书贸易总公司
地址：北京 399 信箱
邮政编码：100044
广告经营许可证　京海工商广字第 8013 号

Edited by Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA
Add：18，Shuangqing Street，Haidian，Beijing 100085，China
Tel：（010）62941099
www. ecologica. cn
Shengtaixuebao@ rcees. ac. cn
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences，CAS
Add：18，Shuangqing Street，Haidian，Beijing 100085，China
Published by Science Press
Add：16 Donghuangchenggen North Street，Beijing　100717，China
Printed by Beijing Bei Lin Printing House，Beijing 100083，China
Distributed by Science Press
Add：16 Donghuangchenggen North Street，Beijing 100717，China
Tel：（010）64034563
E-mail：journal@ cspg. net
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
Add：P. O. Box 399 Beijing 100044，China

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q　　国内外公开发行　　国内邮发代号 82-7　　国外发行代号 M670　　定价 70.00 元