

不同耕作措施下双季稻田生态系统碳循环及其生态服务价值

白小琳¹, 徐尚起¹, 汤文光², 陈 阜¹, 胡 清³, 张海林¹

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院, 农业部农作制度重点开放实验室, 北京 100193; 2. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125; 3. 湖南省宁乡县农业局, 湖南 宁乡 410600)

摘 要:耕作方式对稻田碳循环有着较大的影响。采用田间试验方法,研究了秸秆还田条件下,不同耕作措施双季稻田碳循环及其生态服务价值,为稻田生态服务价值计算及土壤固碳潜力评价提供依据。试验于湖南省宁乡县进行,通过静态箱法测定翻耕秸秆还田(CT)、旋耕秸秆还田(RT)、免耕秸秆还田(NT)稻田 CH_4 及 CO_2 排放,根据美国橡树岭国家生态实验室得出的碳折算系数计算各项农资投入的碳释放。结果表明:(1)机械操作造成的碳排放为 $\text{CT} > \text{RT} > \text{NT}$,免耕分别比翻耕和旋耕碳减排 61.69、35.70 $\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$;(2)含碳农资碳减排对于稻田碳减排具有较大作用,其中减少含碳农资投入对于免耕碳减排作用最大;(3)免耕促进了稻田土壤碳固定,稻田生态系统总体碳固定为 $\text{NT} > \text{CT} > \text{RT}$;(4)采用免耕、减少含碳农资投入有利于固碳及增加稻田生态系统服务价值。本研究得出免耕秸秆还田有利于减少碳排放及增加稻田生态系统生态服务价值,建议长江中下游双季稻区采用以免耕秸秆还田为主的保护性耕作。

关键词:耕作;碳循环;稻田;生态服务价值

中图分类号:S18 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2489-06

Ecosystem Service Value and Carbon Cycle of Double Cropping Paddy Under Different Tillage

BAI Xiao-lin¹, XU Shang-qi¹, TANG Wen-guang², CHEN Fu¹, HU Qing³, ZHANG Hai-lin¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Beijing 100193, China; 2. Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China; 3. Ningxiang Agricultural Bureau, Hunan Province, Ningxiang 410600, China)

Abstract: Tillage influences carbon cycle of paddy greatly. In order to provide theoretical guide for forecasting carbon sequestration potential of soil and evaluating ecosystem service value, a field trial was conducted during 2005 to 2009 to evaluate the performance of the tillage effect on carbon cycle and ecosystem services value. Both early-rice and late-rice straws were returned. During the winter season, rice fields were left fallow under drained. The closed chamber method was used to measure the CH_4 and CO_2 emission from the paddy field with the treatments of conventional tillage(CT), rotary tillage(RT), no-tillage(NT) at Ningxiang County, Hunan Province. Carbon emission of all kinds of agricultural inputs had been calculated by using carbon convert coefficient which was from Oak Ridge National Laboratory. The results showed as following: (1) NT reduced carbon emission by 61.69, 35.70 $\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ compared with CT, RT, respectively, with increasing mechanical strength for NT, RT and CT; (2) The carbon emission reduction of agricultural inputs contributed greatly to carbon reduction, which was the most important carbon reduction aspect for NT; (3) NT was benefit to paddy carbon sequestration; (4) NT and reducing agricultural inputs were benefit to carbon sequestration and increased paddy ecosystem service value. This research got the results that NT attributed to release carbon emission and increase paddy ecosystem service value. So we suggest using NT, which is the main tillage method in conservation tillage, in the double paddy soil area.

Keywords: tillage; carbon cycle; paddy; ecosystem service value

收稿日期: 2009-05-29

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAD15B01); 2008 年公益性行业(农业)科研专项(200803028)

作者简介: 白小琳(1984—), 男, 内蒙古人, 硕士研究生, 主要从事保护性耕作方面的研究。E-mail: caubxl@yahoo.cn

通讯作者: 张海林 E-mail: hailin@cau.edu.cn

碳素循环过程与生态系统稳定性及人类生存密切相关。随着全球气温的不断升高,温室气体排放正成为科学家研究和关注的焦点。据 IPCC 报道,21 世纪初,CO₂ 的温室效应贡献达到 60%,CH₄ 达到 20%,N₂O 达到 6%^[1],大气中的温室气体浓度升高除了来自工业排放外,土地利用也是一个非常重要的影响因素^[2],Smith 等^[3]认为稻田耕作方式不同使得温室性气体排放与吸收平衡发生偏移。稻田是温室气体的重要排放源,中国是水稻生产大国,水稻种植面积约占世界稻田总面积的 22%,产量约占世界水稻产量的 38%^[4],因此稻田生态系统碳循环研究相当重要。当前稻田碳“源”与“汇”关系研究较多^[5-6],但基于不同耕作措施下生态系统碳循环研究较少,因此秸秆还田与耕作措施导致的碳循环差异研究极为必要。

生态系统不仅可以为人类提供物质财富,还可为人类提供各种功能性服务,Costanza 等^[7]发表于 Nature 上关于生态系统服务价值的研究引起了世界的广泛关注,并展开了大量研究;欧阳志云等^[8]于 1999 年首次在我国提出生态系统服务价值的概念。目前生态系统服务价值研究多集中于全球或大区域、流域、某个生态系统及生物多样性等宏观研究^[7,9-10],而基于试验的研究较少^[11-12],秸秆还田条件下,耕作措施导致的稻田碳循环生态服务价值差异还未见报道。对土壤耕作下碳循环生态服务价值的研究有助于量化耕作下生态系统对环境的影响,并可为生态系统合理开发利用提供依据。

少、免耕等保护性耕作技术作为保护性农业的重要技术,已经在世界范围推广^[13]。研究表明,保护性耕作对于节能减排具有重要作用^[14]。因此,开展秸秆还田下翻耕、旋耕与免耕稻田碳循环生态服务价值的研究,有助于为不同耕作措施土壤固碳潜力评价及稻田碳循环生态服务价值评估提供依据。本文拟通过研究不同耕作措施下稻田碳循环及其生态服务价值,将宏观概念引入微观研究,为温室气体减排和我国绿色 GDP 核算提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验设立于湖南省宁乡县保护性耕作试验示范基地(112°18'E,28°07'N),试验地气候为中亚热带向北亚热带过渡的大陆性季风湿润气候,肥力中等,排灌条件良好,年均降水量 1 358.3 mm,年平均气温 16.8 ℃,为典型的双季稻三熟农作区。试验土壤为水稻土,河沙泥土种。种植制度为冬闲-早稻-晚稻,土

壤理化性质见表 1。

表 1 稻田土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties of paddy field

土层/cm	容重/ g·cm ⁻³	有机质/ g·kg ⁻¹	碱解氮/ mg·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	pH
0~20	1.21	34.90	224.10	4.38	97.10	6.26

试验设 3 个处理,每个处理 3 次重复,重复的面积为 66.7 m²,田间完全随机设计。翻耕(CT):水稻抛秧前用铧式犁翻地 1 遍,再用旋耕机旋地两遍,耕深约 15 cm;旋耕(RT):水稻抛秧前用旋耕机旋地 4 遍,耕深约 8 cm;免耕(NT):不进行整地,水稻免耕抛秧。试验于 2005 年开始进行,由于土壤碳循环过程需要较长时间的稳定^[15],本文选取 2008 年 4 月至 2009 年 4 月最晚的数据进行分析。

早稻供试品种为中嘉早 32 号,晚稻供试品种为湘晚粳 13 号。早稻收获后 NT 处理秸秆为地表覆盖还田,CT 和 RT 处理的秸秆在耕作时被翻压还田;晚稻收获后秸秆均为地表覆盖还田,待早稻抛秧前 CT 和 RT 处理的秸秆在耕作时被翻压还田,NT 处理秸秆为地表覆盖还田。各处理秸秆年还田量约为 12 500 kg·hm⁻²。早稻基肥为撒可富复合肥(N:P₂O₅:K₂O=20:12:14)375 kg·hm⁻²;分蘖时追施尿素 150 kg·hm⁻²;晚稻基肥施肥量为撒可富复合肥 375 kg·hm⁻²与尿素 75 kg·hm⁻²,分蘖时追施尿素 75 kg·hm⁻²。各处理在早晚稻插秧前喷洒除草剂(克无踪),为避免非耕作条件对试验结果的影响,各处理除草剂的喷洒量相同,然后插秧。冬闲季不覆水。

1.2 气体采集与分析

采用静态暗箱法采集气体,采样箱为有机玻璃制成,箱底 30 cm×30 cm,高 50 cm,采样箱内包含有生长的水稻。采样时间固定在 9:00—11:00,以避免气体排放日变化对不同观测点观测结果的影响^[16]。气体测定使用 HP6890N 型色谱仪,测定温度 200 ℃,柱型为 Porpak Q 柱,柱温 70 ℃。排放通量由箱中气体浓度随时间的变化率计算得出,通量计算式为:

$$F=\frac{h\times M_w\times T_{st}}{M_o\times (T_{st}+T)}\cdot \frac{dc}{dt}$$

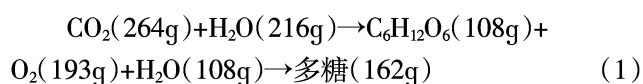
式中:F 为排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹;dc/dt 为箱内痕量气体随时间的变化率;h 为采样箱高;M_w 为痕量气体的摩尔质量;T_{st} 为标准状态下的温度,273.2 K;M_o 为痕量气体的摩尔×体积;T 为测定时的土壤温度。

土壤固定 CO₂ 的检测:生长的水稻被包含于采样

箱内,因此所测定的 CO_2 排放通量包含有水稻 CO_2 排放或吸收、土壤 CO_2 排放或吸收的混合排放量,根据水稻的生物产量计算可得出水稻固定 CO_2 量,混合累积排放量与水稻固定 CO_2 量的差值即为土壤 CO_2 固定量。

1.3 不同耕作措施下稻田碳循环的生态服务价值估算

图 2 为稻田生态系统碳动态变化示意图。碳循环包括光合固定、植物与土壤呼吸排放、耕作、灌溉机械及农药的施用、稻田在厌氧环境下产生 CH_4 。光合作用方程式及稻田碳循环各气体排放的生态服务价值计算公式为^[17]:

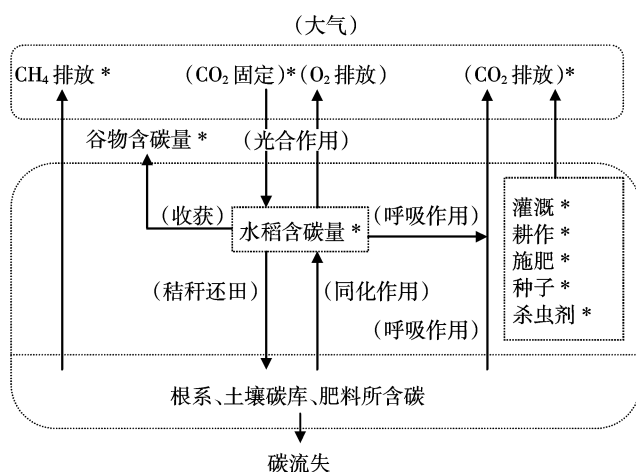


$$E_c = 0.2727 \times a_{\text{GWP}} \times E \quad (2)$$

$$V_c = 1/2(C_{f-\text{CO}_2} + C_f) \times E_c \quad (3)$$

式中: a_{GWP} 为 CH_4 的增温潜势,是根据 IPCC 提供的计算方法,100 年时间尺度上,单位质量的 CH_4 的 GWP (Global Warming Potential) 为 CO_2 的 23 倍; E 为 CH_4 的排放量; E_c 为将 CH_4 排放量换算为碳排放量; $C_{f-\text{CO}_2}$ 为固定 CO_2 的造林成本,为 $0.2609 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_f 为 CO_2 的碳税,为 $1.245 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$; V_c 为固定 CO_2 的生态服务价值。

2008 年双季稻生育期的机械、农药等农资投入造成的碳释放,根据美国橡树岭国家生态实验室得出的碳折算系数可得各项农资投入的碳释放^[15,18]。



试验中研究了带 * 的生态服务价值,不带 * 的则没有考虑在内。

图 2 稻田碳循环示意图

Figure 2 Schematic diagram of carbon dynamics in paddy field ecosystems

1.4 数据处理

采用 SPSS13.0 软件对试验数据进行方差分析和显著性测验。

2 结果与分析

2.1 稻田生态系统人为碳排放

一般来讲,免耕秸秆还田需要较多的农药投入以控制其杂草生长,但在本试验中,当地农田除草措施主要采用化学除草剂进行除草,且与保护性耕作除草剂施用量差异较小,为降低非耕作措施对碳循环试验影响,本试验各处理喷施相同量的除草剂。不同的管理模式及用工量,也将导致较大的碳差异,本试验过程中主要操作过程均采用机械,如各耕作处理均为机械完成,机械收获后秸秆直接还田,减少了难以计算的人力劳动造成的碳排放过程,田间管理模式除耕作措施外均相同,这就避免了各处理间由于耕作措施以外的碳排放差异。

人为碳排放分为机械操作与含碳农资投入碳排放(表 2),根据美国橡树岭国家生态实验室得出的碳折算系数可得各项农资的碳释放,计算含碳农资投入导致的碳排放有利于细化稻田碳循环各项碳排放,为稻田碳减排提供依据。各处理含碳农资投入相同,未引起处理间碳排放差异(表 2)。从稻田生态系统人为碳排放分析,含碳农资投入碳排放翻耕、旋耕、免耕分别占人为投入碳排放 46.60%、50.93%、58.37%,含碳农资碳减排对于人为投入碳减排具有较大作用,且含碳农资投入碳排放的减少对于免耕人为投入碳减排影响最大。

免耕不进行翻耕与旋耕操作,减少了碳排放。机械操作造成的碳排放为 $\text{CT} > \text{RT} > \text{NT}$,免耕碳排放仅为 $-101.69 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别比翻耕和旋耕碳减排 61.69 、 $35.70 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。翻耕、旋耕、免耕机械操作造成的碳排放分别占人为投入碳排放 53.40%、49.07%、41.63%,减少机械操作碳排放对于翻耕碳减排具有较大的作用。农药施用对于人为碳排放影响最大(表 2),为 $-103.57 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.2 稻田生态系统非人为碳排放及固定

稻田生态系统非人为碳排放及固定分为 CH_4 排放、水稻 CO_2 固定、土壤 CO_2 固定(表 2)。水稻固定 CO_2 为 $\text{CT} > \text{NT} > \text{RT}$,差异达显著水平($P < 0.05$),即翻耕具有较大的生物产量。翻耕、旋耕、免耕水稻 CO_2 固定占碳固定量的 94.12%、96.12%、94.07%,生物产量的提高对于碳减排作用最大。稻田土壤为 CO_2 汇,稻田

生态系统固定 CO₂ 为 NT>CT>RT, 差异达显著水平 ($P<0.05$), 即免耕有利于土壤固定 CO₂。

稻田生态系统为大气 CH₄ 排放源 (表 2), 全年 CH₄ 排放在 100 年尺度上 CO₂ 当量碳排放量为 RT>CT>NT, 差异达显著水平 ($P<0.05$), 免耕有利于减少 CH₄ 排放, 免耕分别较翻耕、旋耕减排 CH₄ 为 7.98% 与 17.5%。稻田碳排放主要来源于 CH₄ 排放, 翻耕、旋耕、免耕 CH₄ 排放碳排放分别占稻田碳排放 96.66%、97.46%、97.72%, 稻田 CH₄ 排放减少对于碳减排具有较大的影响。

2.3 稻田碳循环生态服务价值

以稻田作为一个整体的生态系统, 其内部的碳循环最终将会对外界产生影响。以往的生态系统服务价值研究多注重于生态系统整体的生态服务价值^[9], 鲜见对生态系统某一个部分进行细化研究, 而细化研究可明了各组分对整个生态服务价值的贡献, 由此可以进行有目的优化, 为高效提高生态服务价值提供可能。

稻田生态系统碳吸收分为水稻固碳与土壤固碳, 各处理水稻 CO₂ 固定均占碳固定量的 90% 以上, 土壤固碳占固碳比例较小, 各处理均未到 10%; 稻田生态系统碳排放为机械操作、农资投入与 100 年尺度上

CH₄ 排放碳排放, 机械操作碳排放与农资投入碳排放基本相当, 各处理机械操作碳排放与农资投入碳排放均未到 CH₄ 排放碳排放的 5%, 因此不同耕作措施秸秆还田下, 稻田碳循环研究重点为水稻 CO₂ 固定及稻田 CH₄ 排放。

2008 年稻田生态系统表现为碳汇 (表 2), 稻田生态系统全年碳吸收为 NT>CT>RT, 免耕碳吸收为 7 628.51 kg C·hm⁻², 分别比翻耕、旋耕高 4.67%、22.58%。稻田碳循环碳排放与吸收将会对稻田生态系统生态服务价值产生影响, 稻田生态系统全年生态服务价值为 NT>CT>RT, 免耕碳循环生态服务价值为 5 743.89 元·hm⁻², 分别比翻耕、旋耕高 4.67%、22.58%。稻田生态系统生态服务价值主要来自于水稻 CO₂ 固定, 翻耕、旋耕、免耕水稻固定 CO₂ 生态服务价值分别占碳固定生态服务价值的 94.12%、96.12%、94.07%。

3 讨论

3.1 耕作措施对稻田生态系统碳吸收生态服务价值的影响

稻田生态系统生态服务价值大小与机械操作及农资投入关系密切。虽然机械操作对于稻田生态系统碳排放影响较小, 但机械操作碳排放为短时间大量排放, 对于生态环境的影响较大。Lal^[14]综合大量文献表明, 机械操作及农资投入碳排放量为 11~37.4 kg C·hm⁻², 大于投入碳量的 1%, 且为增加的趋势; 伍芬琳等^[20]研究指出, 免耕机械操作较翻耕、旋耕碳排放均有减少。综上所述, 免耕可有效减少机械操作碳排放, 即免耕相对于旋耕与翻耕有助于增加稻田碳循环生态服务价值。

免耕增加了稻田生态系统的土壤碳吸收, 稻田生态系统全年碳吸收为 NT>CT>RT, 免耕碳吸收分别比翻耕、旋耕高 4.67%、22.58%。Metay 等^[21]研究巴西免耕稻田认为, 免耕可以增加土壤碳吸收, 且长年免耕可以增加土壤碳汇潜力; 唐晓红等^[22]研究表明, 稻田免耕土壤有机碳含量较高, 达 30.71 g·kg⁻¹。基于本试验研究及以上讨论得出, 免耕有利于土壤固碳, 即免耕有利于提高稻田生态系统生态服务价值。

3.2 CH₄ 排放及 CO₂ 固定

水稻固定 CO₂ 为 CT>NT>RT, 即水稻生物产量为 CT>NT>RT, 免耕较翻耕减少固碳 0.86%, 差异较小。当前免耕对于产量的影响还没有确定的结论, Reis 等^[23]研究得出免耕与翻耕产量差异较小, 但免耕

表 2 稻田碳固定及生态服务价值
Table 2 Paddy ecosystem service value and carbon sequestration

处理	翻耕	旋耕	免耕
1.机械操作碳排放(kg C·hm ⁻²)			
翻耕	-43.84	0.00	0.00
旋耕	-17.85	-35.70	0.00
收获	-68.20	-68.20	-68.20
灌溉	-33.49	-33.49	-33.49
合计	-163.38	-137.39	-101.69
2.农资投入碳排放(kg C·hm ⁻²)			
农药	-103.57	-103.57	-103.57
种子	-9.08	-9.08	-9.08
化肥	-29.95	-29.95	-29.95
合计	-142.60	-142.60	-142.60
3.CO ₂ 与 CH ₄ 排放碳排放(kg C·hm ⁻²)			
生物量	11 467.30	11 187.50	11 368.30
CH ₄ 排放	-4 732.50	-5 278.60	-4 354.80
土壤固定 CO ₂	716.11	451.59	716.66
合计	7 450.87	6 360.50	7 730.20
4.总计(kg C·hm ⁻²)			
生态服务价值(元·hm ⁻²)	5 487.12	4 685.70	5 743.89

注: 柴油的密度按 0.85 kg·L⁻¹, 翻耕 54 kg·hm⁻², 旋耕 42 kg·hm⁻², 收获 84 kg·hm⁻²。碳排放为“-”; 同化为“+”。

使得水稻茎秆降低,并减少了病害;刘世平等^[24]研究免耕套种却发现:第一年免耕对产量未见影响,第二年免耕产量下降,但稻米的品质提高。免耕条件下的产量争议有待进一步研究。本试验表明稻田土壤为CO₂汇,稻田土壤固定CO₂为NT>CT>RT,免耕有利于稻田固碳,这与Passianoto等^[25]的研究结论相同,Passianoto等研究发现耕作后2个月里免耕较翻耕减少CO₂排放44%。

本研究表明,免耕CH₄排放较其他处理少。可能原因为CH₄的氧化主要发生在水土交界面氧化层以及水稻根际^[4]。免耕秸秆覆盖于土壤表面,残茬增大了土表氧化层的比表面积,增大了氧化层,使得CH₄氧化较多;其次可能由于免耕秸秆覆盖使得土壤不能直接接受太阳辐射,土壤升温没有其他处理快,产生的CH₄较少^[26],各处理秸秆覆盖效应的差异一直可以持续到作物覆盖的作用超过秸秆覆盖的作用^[27]。

3.3 耕作措施及稻田碳循环生态价值研究前景

国内稻田投入碳排放的研究较少,缺乏定量的计算,国内研究只能使用美国橡树岭国家实验室的碳折算系数进行折算,开展国内碳排放的研究及相关定量计算对我国碳潜力评估有较大意义。

限于试验条件,本试验未对劳力投入碳排放进行定量计算,导致稻田生态系统碳排放量估算偏低,另外,免耕在人工投入上相对较少,这点也没有考虑。进行劳力投入碳排放估算,有利于精确估算稻田碳排放量。

为研究不同耕作措施间的差异,本试验过程中田间管理措施相同,造成农资投入含碳投入没有变化。但在实际操作中,应根据当地的特点进行管理,因此进行农作制度差异研究就有很大的必要。

4 结论

(1)免耕可有效减少机械操作碳排放,机械操作造成的碳排放为CT>RT>NT,免耕分别比翻耕和旋耕碳减排61.69、35.70 kg C·hm⁻²。

(2)含碳农资投入未引起各处理碳循环差异,但从人为投入来讲,含碳农资碳减排对于稻田碳减排具有较大作用,其中减少含碳农资投入对于免耕碳减排影响最大。

(3)秸秆还田条件下,免耕虽降低了产量,但其促进了稻田土壤碳固定,稻田生态系统总体碳固定为NT>CT>RT,免耕分别比翻耕、旋耕高4.67%、22.58%。

(4)秸秆还田条件下,采用免耕、减少含碳农资投

入的碳排放有助于固碳及增加稻田生态系统服务价值,免耕分别比翻耕、旋耕高4.67%、22.58%。

综上所述,免耕秸秆还田有利于减少稻田碳排放及增加稻田生态系统生态服务价值,建议长江中下游双季稻区采用以免耕秸秆还田为主的保护性耕作。

参考文献:

- [1] Bernard S B, Soussana J F. Greenhouse gas emissions and climate change: causes and consequences observed for agriculture and animal production[J]. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 2008, 55: 79-91.
- [2] Furukawa Y, Inubushi K, Ali M, et al. Effect of changing groundwater levels caused by land-use changes on greenhouse gas fluxes from tropical peat lands[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2005, 71(1): 81-91.
- [3] Smith K A, Conen F. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(Supplement): 255-263.
- [4] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 600-612.
WANG Ming-xing, LI Jing, ZHENG Xun-hua. Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transportation in the rice fields[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22(4): 600-612.
- [5] Bender M, Conrad R. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(12): 1517-1527.
- [6] Baggs E M, Chebii J, Ndafa J K. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 90(1-2): 69-76.
- [7] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [8] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
OUYANG Zhi-yun, WANG Ru-song, ZHAO Jing-zhu. Ecosystem services and their economic valuation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 635-640.
- [9] Pattanayak S K. Valuing watershed services: Concepts and empirics from southeast Asia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(1): 171-184.
- [10] Turner W R, Brandon K, Brooks T M. Global conservation of biodiversity and ecosystem services[J]. *Bio Science*, 2007, 57(10): 868-873.
- [11] Longland W S, Bateman S L. Viewpoint: The ecological value of shrub islands on disturbed sagebrush rangelands[J]. *Journal of Range Management*, 2002, 55(6): 571-575.
- [12] Pankratz S, Young T, Cuevas-Arellano H, et al. The ecological value of constructed wetlands for treating urban runoff[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 55(3): 63-69.
- [13] Cavalieri K M V, Silva A P, Da Tormena C A, et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(1): 158-164.
- [14] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment Interna-*

- tional, 2004, 30(7):981-990.
- [15] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1930-1946.
- [16] 李 晶, 王明星. 稻田甲烷排放非连续测量中采样时间的选择[J]. 中国科学院研究生院学报, 1998, 15(1): 24-29.
- LI Jing, WANG Ming-xing. Time selection for non-continuous measurements of methane emission from rice paddy fields [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 1998, 15(1): 24-29.
- [17] 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.
- [18] West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: methodology for full carbon cycle analyses[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 439-444.
- [19] Zhang W, Ricketts T H, Kremen C, et al. Ecosystem services and dis-services to agriculture[J]. *Ecological Economics*, 2007, 2(64): 253-260.
- [20] 伍芬琳, 李 琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2035-2039.
- WU Fen-lin, LI Lin, ZHANG Hai-lin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [21] Metay A, Moreira J A A, Bernoux M, et al. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil)[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(1): 122-132.
- [22] 唐晓红, 邵景安, 黄雪夏, 等. 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 235-243.
- TANG Xiao-hong, SHAO Jing-an, HUANG Xue-xia, et al. Distribution of soil organic carbon in purple paddy field under long-term non-tillage ridge culture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 235-243.
- [23] Reis M D S, Soares A A, Cornelio V M, et al. Upland rice cultivars and lineages performance under no-till and conventional tillage[J]. *Cienciae Agrotecnologia*, 2008, 32(5): 1435-1440.
- [24] 刘世平, 聂新涛, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对水稻生长和稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007(1): 71-76.
- LIU Shi-ping, NIE Xin-tao, DAI Qi-gen, et al. Effects of interplanting with zero tillage and wheat straw manuring on rice growth and grain quality[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007(1): 71-76.
- [25] Passianoto C C, Ahrens T, Feigl B J. Emissions of CO₂, N₂O, and NO in conventional and no-till management practices in Rondonia, Brazil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(4): 200-208.
- [26] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 604-608.
- DING Wei-xin, CAI Zu-cong. Effect of temperature on methane production and oxidation in soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4): 604-608.
- [27] 秦红灵, 高旺盛, 李春阳. 北方农牧交错带免耕对农田耕层土壤温度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 40-47.
- QIN Hong-ling, GAO Wang-sheng, LI Chun-yang. Impacts of no-tillage on soil temperature of field in Ecotone of North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(1): 40-47.