

保水剂用量对农田生态系统碳足迹的影响^{*}

杨永辉¹ 武继承^{1,2} 赵世伟³ 潘晓莹^{1,2} 何方^{1,2}

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2. 农业部作物高用水原阳科学观测站, 原阳 453514;
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 采用田间试验, 对不同保水剂用量条件下冬小麦碳吸收、碳排放、碳成本、碳效率及碳净汇等进行了研究。结果表明: 农业生产过程中虽然保水剂和各种农资投入会产生一定的碳足迹, 但其同时促进了作物生长, 提高了作物的干物质量, 从而显著提高碳吸收, 降低碳成本, 提高碳效率和碳净汇。各处理中 60 kg/hm² 保水剂用量的碳成本最低, 较对照减少了 25.6%, 而其碳效率和碳净汇最大, 较对照分别提高了 35.3% 和 30.6%。施用保水剂提高了冬小麦的水分利用效率, 且以 60 kg/hm² 保水剂用量效果最佳。相关性分析表明水分利用效率与碳吸收、碳效率和碳净汇呈显著正相关, 而与碳成本呈极显著负相关。

关键词: 保水剂 农田生态系统 碳吸收 净碳汇 碳足迹

中图分类号: S482.99; S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0126-06

Impact of Super Absorbent Polymers Dosage on Carbon Footprint of Farmland Ecological System

Yang Yonghui¹ Wu Jicheng^{1,2} Zhao Shiwei³ Pan Xiaoying^{1,2} He Fang^{1,2}

(1. Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China
2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to investigate the effect of super absorbent polymers (SAP) dosage on the carbon footprint of farmland ecological system, a field experiment was conducted to study carbon absorption, carbon emission, carbon cost, carbon efficiency and net carbon sink. The results indicated that although the application of SAP and various agricultural inputs increased farmland carbon footprint, they promoted the growth of crop and improved quality of crop dry biomass. Thus SAP and various agricultural inputs significantly improved the carbon absorption, reduced carbon cost and improved the efficiency of carbon and net carbon sink. Carbon cost of the treatment with 60 kg/hm² of SAP was the minimum, which was reduced by 25.6% compared with the control, while its carbon efficiency and net carbon sink were the maximum, which were increased by 35.3% and 30.6% than that of the control, respectively. Meanwhile, SAP could improve water use efficiency of winter wheat, the treatment with 60 kg/hm² of SAP was the best. The correlation analysis among different factors showed that positive correlations were found between water use efficiency, carbon sequestration, carbon efficiency and carbon net sink, while negative correlation was found between water use efficiency and carbon cost.

Key words: Super absorbent polymers Farmland ecological system Carbon absorption Net carbon sink Carbon footprint

收稿日期: 2014-05-15 修回日期: 2014-06-20

^{*} 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102904)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD07B07)、国家自然科学基金资助项目(U1404404)和公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203077)

作者简介: 杨永辉, 副研究员, 博士, 主要从事土壤生态与节水农业研究, E-mail: yangyongh@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 赵世伟, 研究员, 主要从事节水农业与农田碳足迹研究, E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn

引言

碳足迹(Carbon footprint, CF)是对某种活动引起的或某种产品生命周期内积累的直接或间接的CO₂排放量的度量^[1]。碳足迹作为一种测量碳排放对全球环境影响和压力程度的新方法,近年来成为国外生态研究的热点^[2]。

农田生态系统主要受人为因素控制,必须不断地从事播种、施肥、灌溉、除草和治虫等活动,才能使农田生态系统朝着对人类有益的方向发展。而农田生态系统具有较高的生物生产量,是一个能量和物质大量流通的开放系统。为使系统保持平衡并具有一定的生产力水平,必须通过多种途径投入人力、畜力、水以及用于开动各种农业机械的化石燃料等物质和能源,以补偿产品输出后出现的亏损。因此,伴随着各种物质和能量的输入、输出,农田经营过程也是碳物质输入、输出的碳循环过程^[3-4]。

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,与人类关系最为密切,同时也是重要的大气碳源和碳汇。一方面,大气中20%的CO₂、70%的CH₄和90%的N₂O来源于农业活动及其相关过程^[5];另一方面,全球农田也是巨大的碳库,其碳储量达170 Pg(1 Pg=10¹⁵ g),占全球陆地碳储量的10%以上^[6]。据Cole等^[7]估计,在未来的50~100 a,全世界农田可固碳20~30 Pg。另据Lal^[8]研究,全球耕地总固碳潜力为0.75~1.00 Pg/a。这表明农田生态系统特别是农田土壤具有巨大的固碳潜力。

目前,农业碳足迹的研究主要集中在区域农业碳足迹、作物碳足迹和粮食碳足迹(碳成本)方面。国外学者对冬油菜、春燕麦及冬小麦等多种农作物从播种到收获整个田间生长期的碳足迹进行了研究^[9-13]。国内学者进行了小麦-玉米的碳足迹研究^[14-16]。保水剂作为旱作节水农业的重要措施,其本身在生产过程中需要消耗大量电能,因此存在一定的碳排放。但同时保水剂能够改善作物水分环境,促进水分利用,提高作物产量和生物量,增加碳固定,从而对农田生态系统碳足迹的改变产生重要影响,而有关这方面的研究却鲜见报道。

本文研究不同保水剂用量对碳足迹的影响,旨在分析保水剂与碳吸收和碳释放之间的关系,从而为保水剂应用过程中对农田碳收支的影响提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验在河南省禹州试验基地(113°03'~

113°39'E,33°59'~34°24'N)进行,海拔高度116.1 m,多年平均降水量674.9 mm,其中60%以上集中在夏季,存在较严重的春旱、伏旱和秋旱;土壤为褐土,土壤母质为黄土性物质,该地区地势平坦,肥力均匀,耕层有机质质量比12.3 g/kg、全氮质量比0.80 g/kg、水解氮质量比47.82 mg/kg、速效磷质量比6.66 mg/kg、速效钾质量比114.8 mg/kg。前茬作物为玉米。

1.2 试验设计

根据以往的研究,设置4个保水剂用量,其中,处理1:0 kg/hm²(对照CK)、处理2:30 kg/hm²、处理3:60 kg/hm²、处理4:90 kg/hm²,在田间采取随机区组设计,小区面积4 m×6 m,各处理重复3次,共12个小区。播种前用纯氮180 kg/hm²和普通磷酸钙(P₂O₅)90 kg/hm²作底肥,分别在小区内均匀撒施。于2012年10月中下旬播种,冬小麦播种量为150 kg/hm²。播种前将保水剂与肥料混合后一起施撒于小区内,进行翻耕播种。在冬小麦拔节期、孕穗期、灌浆期和收获期进行生物样采集。

1.3 试验材料

冬小麦品种为郑麦9694。保水剂由河南省农科院植物营养与资源环境研究所研制,主要成分为聚丙烯酰胺类物质,呈白色粉末状。

1.4 主要参数估算

1.4.1 水分利用效率计算

水分利用效率为作物经济产量(籽粒)与全生育期0~100 cm土层耗水量的比值。

全生育期0~100 cm土层耗水量为作物播种前0~100 cm土层土壤储水量与生育期内降水量或灌水量之和,减去作物收获时0~100 cm土层土壤储水量。

1.4.2 冬小麦植株含碳率测定

冬小麦收获时在样地采集冬小麦植株样品,将其带回实验室内采用重铬酸钾氧化-外加热法(GB 7875—87)^[9]测定其含碳率。

1.4.3 碳吸收量

农田作物碳吸收量主要来自作物光合作用产生的有机质,即农作物生产过程中光合作用所固定的碳,不包括作物呼吸作用释放的碳。农田生态系统碳吸收量主要为农作物生育期的碳吸收量,其计算式为

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_{di} = \sum_{i=1}^n C_{fi} D_{wi} = \sum_{i=1}^n C_{fi} Y_{wi} / H_i \quad (1)$$

式中 C_{di} ——第*i*类农作物全生育期的碳吸收量, kg Ce/hm²

C_{fi} ——第*i*类农作物合成单位有机质干物质的含碳量,即含碳率

D_{wi} ——第 i 类农作物总生物量

Y_{wi} ——第 i 类作物的经济产量

H_i ——第 i 类作物的经济系数

1.4.4 碳排放或碳足迹

碳排放主要从不同碳排放途径,并结合碳转化系数进行估算。农田生态系统碳排放总量(E_i)包括化肥、农药、农膜、农机、灌溉等投入在生产、运输及使用过程中的直接或间接的碳释放,其在数值上等于碳足迹。

农田碳足迹边界从农田翻耕开始到农作物收获移出田块结束。本研究农田碳足迹采用 IPCC 法估算,即

$$E_i = CF = \sum_{i=1}^N CF_i = \sum_{i=1}^N (m\alpha)_i \quad (2)$$

式中 E_i ——各项生产投入的碳排放量, kg Ce/(hm²·a)

CF ——农作物的碳足迹, kg Ce/(hm²·a)

CF_i ——第 i 种能源或农资造成的碳足迹, kg Ce/(hm²·a)

m ——第 i 种能源或农资的消耗量, kg

α ——第 i 种能源或农资的碳排放参数

1.4.5 净碳汇

净碳汇(N_i)是指农作物生育期的碳吸收量与农业投入带来的碳排放量(E_i)的差值,即农田生态系统的净碳吸收量。 $N_i > 0$,则说明农田生态系统是一个碳汇; $N_i < 0$,则说明农田生态系统是一个碳源。表达式为

$$N_i = C_i - E_i \quad (3)$$

1.4.6 碳排放参数选择

由于农田作物碳足迹研究的发展尚处在初级阶段,国内许多碳排放参数还不健全。因此,本研究的碳排放参数主要是参考前人的研究结果,首选国内的碳排放参数,其次选取国外的参数。本研究农田物质的碳排放参数氮肥为 1.74 kg/kg^[17]、钾肥为 0.15 kg/kg^[18]、除草剂为 6.30 kg/kg^[18]、杀虫剂为 5.10 kg/kg^[18]、灭菌剂为 3.90 kg/kg^[18]、柴油为 0.94 kg/kg^[18]、电能为 0.25 kg/(kW·h)^[17-19]、冬小麦种子为 0.11 kg/kg^[20]。

保水剂本身的碳足迹产生途径为:

(1)单体丙烯酸酰胺(以丙烯腈为原料,在催化剂作用下水合生成丙烯酸酰胺单体的粗产品,经闪蒸、精制后得精丙烯酸酰胺单体,其为聚丙烯酰胺的生产原料)合成过程中所耗电能(1980 kW·h/t)。

(2)单体丙烯酸酰胺合成聚丙烯酰胺过程(以丙烯酸酰胺水溶液为原料,在引发剂的作用下,进行聚合反应,在反应完成后生成聚丙烯酰胺胶块经切割、造

粒、干燥、粉碎,最终制得聚丙烯酰胺产品)中所消耗的电能(2500 kW·h/t)。

(3)原材料运至合成厂家过程中消耗的柴油量(每吨保水剂运送过程中的柴油消耗量,2.8 kg/t)。

因此,保水剂的碳足迹按从丙烯腈开始至最终合成聚丙烯酰胺过程中的耗电量和原材料运输过程中的柴油消耗量进行计算。

1.4.7 碳成本与碳效率

农作物的碳成本是指农作物碳足迹与农作物单位面积产量的比值,单位为 kg Ce/kg,即单位面积作物产量造成的碳排放量;碳效率是指农作物单位面积产量与农作物碳足迹的比值,单位为 kg/(kg Ce),即单位碳排放量带来的作物产量,碳成本与碳效率互为倒数关系,均为评价农作物碳足迹大小的指标。

1.5 数据处理

试验结果均为 3 次重复的算术平均值,同时采用统计学及相关的数理统计软件(DPS)进行处理。

2 结果与分析

2.1 保水剂用量对冬小麦生物量、含碳率及碳吸收量的影响

从表 1 中可知,各保水剂处理的冬小麦生物量和碳吸收量明显大于对照,而各处理的含碳率差异不显著。随保水剂用量的增加,冬小麦的生物量和碳吸收量均表现为先增加后降低的趋势。各处理中均以保水剂 60 kg/hm²处理较对照生物量和碳吸收量增幅最大,分别较对照提高了 27.1% 和 28.7%。表明在相同养分和田间管理条件下,施用保水剂显著提高了冬小麦各生育期的生物量,促进了碳累积吸收量的增加,有利于碳固定。

表 1 不同用量保水剂冬小麦生物量、含碳率及碳吸收量分析

Tab. 1 Analysis of biomass, carbon content and carbon uptake of winter wheat with different SAP dosages

保水剂用量 /(kg·hm ⁻²)	生物量 /(kg·hm ⁻²)	含碳率 /%	碳吸收量 /(kg Ce·hm ⁻²)
0	7 752.3 ^d	48.5 ^a	3 759.9 ^d
30	9 147.6 ^c	48.2 ^a	4 409.2 ^c
60	9 852.2 ^a	49.1 ^a	4 837.4 ^a
90	9 542.3 ^b	49.3 ^a	4 704.4 ^b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2 冬小麦物质投入及碳足迹

在冬小麦整个生长过程中,农田物质投入主要包括:保水剂(原材料运输所耗柴油和单体生产与聚合合成过程中的电能)、化肥、农药(除草剂、杀虫

剂和灭菌剂)、机械(耕种与收获时的柴油)和种子5部分。本研究为旱地,无灌水,作物所需水分全靠自然降水。因此通过以上估算方法得出各部分投入量及碳足迹如表2表示。

从表2可以看出,除保水剂生产过程中本身的碳足迹外,冬小麦的碳足迹为460.7 kg Ce/(hm²·a),是冬小麦犁地、播种及收获时所消耗的柴油,以及防治冬小麦病虫害、施肥及种子投入等碳足迹的总和。而保水剂生产过程中投入的电能分别为134.4、268.8和403.2 kW·h/(hm²·a)。施肥量主要为氮肥和钾肥底施,没有磷肥的投入。其中,氮肥投入

180 kg/(hm²·a),钾肥投入量为90 kg/(hm²·a)。冬小麦种子投入为150 kg/(hm²·a),耕种及收获投入的柴油量为118.5 kg/(hm²·a),杀虫剂、灭菌剂、除草剂等农药使用前需要进行高度稀释后再喷洒,因此投入量较少。

不同投入量中化肥的总碳足迹最大,为326.7 kg Ce/(hm²·a)。保水剂碳足迹随其用量增加而增加,分别为33.60、67.20、100.80 kg Ce/(hm²·a)。冬小麦播种、收获时消耗柴油所产生的碳足迹也较大,为111.39 kg Ce/(hm²·a),其次为种子,而杀虫剂、农药等碳足迹较低。

表2 冬小麦农田主要物质投入量和碳足迹

Tab.2 Carbon footprint emissions of main material inputs of winter wheat

项目	投入量	碳足迹/(kg Ce·hm ⁻² ·a ⁻¹)
机械(柴油消耗)/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	柴油	118.5
	杀虫剂	0.70
	灭菌剂	0.56
农药/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	除草剂	0.05
	氮肥	180
化肥/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	钾肥	90
	种子/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	150
保水剂生产所耗电能/(kW·h·hm ⁻² ·a ⁻¹)	用量30 kg/hm ²	134.4
	用量60 kg/hm ²	268.8
	用量90 kg/hm ²	403.2
保水剂原料运输所耗柴油/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	用量30 kg/hm ²	0.05
	用量60 kg/hm ²	0.17
	用量90 kg/hm ²	0.22

2.3 冬小麦碳足迹、碳成本及碳效率分析

不同处理因保水剂用量不同,故其碳足迹不同。同时,因不同保水剂对冬小麦产量影响的差异,其碳成本和碳效率也存在一定的差异。从表3中可以看出,随保水剂用量的增加,碳足迹逐渐增大。而碳成本以对照最高,为0.1467 kg Ce/kg。保水剂用量

60 kg/hm²处理的碳成本最低,为对照的74.4%,且碳效率仍以保水剂用量60 kg/hm²处理最高,即每产生1 kg的碳排放会生产9.2 kg的粮食,而对照的碳效率最低。说明保水剂的施用可有效降低碳成本,提高碳效率,且以保水剂用量60 kg/hm²处理效果最佳。

表3 冬小麦碳足迹、碳成本及碳效率比较

Tab.3 Comparison among carbon footprint, carbon cost and carbon efficiency of winter wheat

保水剂用量/(kg·hm ⁻²)	单产/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	碳足迹/(kg Ce·hm ⁻² ·a ⁻¹)	碳成本/(kg Ce·kg ⁻¹)	碳效率/(kg·(kg Ce) ⁻¹)
0(CK)	3 141.1 ^d	460.7 ^d	0.1467 ^a	6.8 ^c
30	3 652.3 ^c	494.3 ^c	0.1354 ^b	7.4 ^b
60	4 836.4 ^a	528.1 ^b	0.1092 ^c	9.2 ^a
90	4 397.6 ^b	561.7 ^a	0.1277 ^b	7.8 ^b

2.4 不同处理净碳汇比较

从图1中可以看出,不同处理的净碳汇均显著大于零,随保水剂用量的增加而表现为先增加再降低的趋势,且均显著高于对照。说明种植冬小麦可有效提高碳汇,而保水剂的应用具有促进碳汇提高的作用,尤其是保水剂用量60 kg/hm²处理,较对照净碳汇提高了30.6%。

2.5 保水剂不同用量水分利用效率分析

保水剂通过改善土壤水分环境,能够调节作物的光合作用^[21],提高叶片水平下单位水分的碳同化效率,从而影响有机物质的合成效率和有机物质向作物籽粒中的转化。因此,作物的水分利用效率能够反映碳的同化、运移及固定能力。从图2中可知,随保水剂用量的增加,冬小麦籽粒的水分利用效率

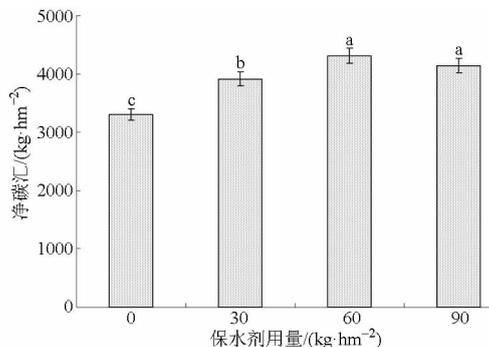


图1 不同处理净碳汇比较

Fig.1 Comparison of net carbon sink in different treatments

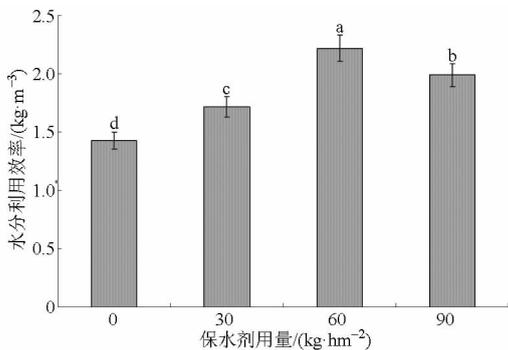


图2 不同处理对冬小麦水分利用效率的影响

Fig.2 Effects of different treatments on water use efficiency of winter wheat

表现为先增加后降低的趋势。各处理中以保水剂用量 60 kg/hm² 处理的水分利用效率最高, 较对照提高 55.2%。说明保水剂能够提高单位水分的有机物合成效率, 促进有机物(碳)向籽粒中的转化, 增加碳固定, 改变碳足迹。

2.6 水分利用效率与碳足迹等的相关性分析

对冬小麦水分利用效率与碳足迹、碳吸收、碳成本、碳效率及碳净汇等进行相关性分析, 结果如表 4 所示。水分利用效率与碳吸收、碳效率和净碳汇呈显著正相关 ($P < 0.05$), 而与碳成本呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与碳足迹呈正相关关系, 但不显著 ($P > 0.05$)。说明水分利用效率与碳足迹等存在一定的内在关系。

表4 作物水分利用效率与碳足迹等指标的相关性分析

Tab.4 Correlation analysis among water use efficiency, carbon footprints and other indicators

指标	碳足迹	碳吸收量	碳成本	碳效率	净碳汇
水分利用效率	0.819 5	0.998 6*	-0.980 6*	0.967 5*	0.993 1*

注: * 表示 $P < 0.05$ 。

3 讨论

农田生产经营过程必然存在碳的输入与输出过程, 为使系统保持碳素收支平衡并维持较高的碳生

产力水平, 必须通过多种途径投入化肥、农药、机械燃油、电力及人力等大量物质和能量, 以补偿产品输出后出现的亏损, 而这些过程均需要化石能源的消耗, 并释放 CO₂ 影响大气环境^[22]。要减小农田系统中的碳足迹, 必须构建良好的农田生态系统, 提高农作物产量品质, 增强碳吸收能力, 减少化石能源的消耗, 减少碳排放^[23]。

保水剂作为一种高分子化合物, 其自身生产过程中会消耗一定的能源, 从而会产生一定的碳排放或碳足迹。保水剂施入土壤后, 可通过调控土壤水分环境影响作物光合作用和光合产物的合成与有机碳储量和干物质积累^[24]。而作物碳储量不仅与光合作用密切相关, 其还直接影响作物的产量。研究发现保水剂在提高冬小麦碳储量的同时, 也促进了作物产量的提高, 减缓了籽粒中碳的循环速度, 因为作物籽粒碳进入社会生活领域后, 其籽粒中的碳暂时脱离出碳循环, 从而提高碳汇功能。

不同农资投入对于冬小麦生产过程中的碳足迹产生重要影响。本研究发现冬小麦农资部分的碳足迹为 460.7 kg Ce/(hm²·a), 其中化肥占的比例最大, 其次为农机耕种、收获等消耗柴油所产生的碳足迹。尽管保水剂生产过程中会产生一定的碳排放或碳足迹, 但保水剂的施用显著提高了作物的生物量^[25], 而作物生长过程中的生物量(干物质)的积累本身就是碳吸收(碳汇)过程, 从而有利于碳的固定。

施用保水剂不仅有利于提高碳汇, 减少碳排放, 且还可在提高作物产量的同时, 促进水分利用效率的提高, 其中以保水剂 60 kg/hm² 处理效果最佳, 较对照提高 55.2%。从而实现了粮食生产和减少碳排放的双赢。说明保水剂通过提高单位水分的有机物合成效率, 进而促进有机物(碳)向籽粒中的转化, 增加碳固定。

4 结论

(1) 保水剂施用后有利于提高作物的干物质质量, 进而促进碳吸收。冬小麦的生物量和碳吸收量随保水剂用量的增加均表现为先增后降的趋势, 其中以 60 kg/hm² 保水剂用量较对照增幅最大, 其生物量和碳吸收量分别较对照提高 27.1% 和 28.7%。

(2) 随保水剂用量的增加, 碳足迹逐渐增大, 而碳成本表现为先降后增的趋势。各处理中 60 kg/hm² 保水剂用量的碳成本最低, 而其碳效率最高, 较对照提高了 41.2%, 即每产生 1 kg 的碳排放会生产 9.2 kg 的粮食。施用保水剂显著提高了净碳汇, 且仍以 60 kg/hm² 保水剂用量效果最佳, 较对照提高

30.6%。

(3)施用保水剂显著提高了冬小麦的水分利用效率,随保水剂用量的增加,其水分利用效率表现为先增后降的趋势,但均显著高于对照。通过对冬小

麦籽粒水分利用效率与碳足迹等的相关性分析得出:水分利用效率与碳效率及净碳汇呈显著正相关,而与碳成本呈极显著负相关。

参 考 文 献

- Weidema B P, Thrane M, Christensen P. Carbon footprint—a catalyst for life cycle assessment[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(1): 3–6.
- Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: a global, trade-linked analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(16): 6414–6420.
- Falkowski P, Scholes R J, Boyle E. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system[J]. *Science*, 2000, 290(5490): 291–295.
- Fan S, Gloor M, Mahlman J. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models[J]. *Science*, 1998, 282(5388): 442–446.
- Bouwman A F. Soils and the greenhouse effect[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1990: 575.
- Lal R, Bruce J P. The potential of world crop land soil to sequester and mitigate the greenhouse effect[J]. *Environment Science & Policy*, 1990, 2(2): 177–185.
- Frenay R G, Heinemeyer O, Kolchugina T, et al. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emission[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- Lal R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment[J]. *Soil & Tillage Research*, 1997, 43(1–2): 81–107.
- 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- Nelson R G, Hellwinckel C M, Brandt C C, et al. Energy use and carbon dioxide emissions from cropland production in the United States, 1990–2004[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2): 418–425.
- Hillier J, Whittaker C, Dailey G, et al. Greenhouse gas emissions from four bioenergy crops in England and Wales: integrating spatial estimates of yield and soil carbon balance in life cycle analyses[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2009, 1(4): 267–281.
- Röös E, Sundberg C, Hansson P. Uncertainties in the carbon footprint of food products—a case study on table potatoes[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15: 478–488.
- Mondelaers K, Aertsens J, Van H G. A Meta-analysis of the differences in environmental impacts between organic and conventional farming[J]. *British Food Journal*, 2009, 111(10): 1098–1119.
- 梁龙, 吴文良, 孟凡乔. 华北集约高产农田温室气体净排放研究初探[J]. *中国人口资源与环境*, 2010, 20(3): 47–50.
Liang Long, Wu Wenliang, Meng Fanqiao. Research of net emission of farmland greenhouse gases of intensive farmland in north of China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(3): 47–50. (in Chinese)
- 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 Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effects of conservation on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035–2039. (in Chinese)
- 韩宾, 孔凡磊, 张海林, 等. 耕作方式转变对小麦/玉米两熟农田土壤固碳能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 91–98.
Han Bin, Kong Fanlei, Zhang Hailin, et al. Effects of tillage conversion on carbon sequestration capability of farm land soil doubled cropped with wheat and corn[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 91–98. (in Chinese)
- 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2239–2250.
Lu Fei, Wang Xiaoke, Han Bing, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2239–2250. (in Chinese)
- 罗良国, 近藤始彦, 伊藤纯雄. 日本长期不同施肥稻田 N₂O 和 CH₄ 排放特征及其环境影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3200–3206.
Luo Liangguo, Kondo Motohiko, Itoh Sumio. N₂O and CH₄ emission from Japan rice fields under different long-term fertilization patterns and its environmental impact[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3200–3206. (in Chinese)
- Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981–990.
- 徐小明. 吉林西部水田土壤碳库时空模拟及水稻生产的碳足迹研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- 杨永辉, 武继承, 何方, 等. 保水剂用量对冬小麦光合特性及水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 131–135.
Yang Yonghui, Wu Jicheng, He Fang, et al. Effect of dosage of water-retaining agent on photosynthetic characteristics and water utilization in different growth stages of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 131–135. (in Chinese)

参 考 文 献

- 1 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- 2 Nicolovsky D J, Romanovsky V E, Panteleev G G. Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 55(1): 120-129.
- 3 任图生,邵明安,巨兆强,等. 利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 I. 原理[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 225-229.
Ren Tusheng, Shao Ming'an, Ju Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry I. theory[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 225-229. (in Chinese)
- 4 陆森,任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 13-18.
Lu Sen, Ren Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 13-18. (in Chinese)
- 5 陆森,任图生,杨洪,等. 多针热脉冲技术测定土壤热导率误差分析[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 20-25.
Lu Sen, Ren Tusheng, Yang Hong, et al. Error analysis of multi-needle heat pulse probe for soil thermal conductivity measurement [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 20-25. (in Chinese)
- 6 Lu S, Ren T, Gong Y, et al. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 8-14.
- 7 Johansen O. Thermal conductivity of soils[R]. *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*, 1977.
- 8 Côté J, Konrad J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(2): 443-458.
- 9 王卫华,王全九,张志鹏. 流域尺度土壤导气率空间分布特征与影响因素分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 118-124.
Wang Weihua, Wang Quanjiu, Zhang Zhipeng. Basin scale spatial distribution of soil air permeability and analysis of its impact factors[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 118-124. (in Chinese)
- 10 Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability [M]. Wageningen: Pudoc Scientific Publishers, 1995: 209-234.
- 11 李海滨,王政权. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 651-657.
Li Habin, Wang Zhengquan. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6): 651-657. (in Chinese)
- 12 王卫华,王全九,武向博,等. 黑河中游绿洲麦田土壤水气热参数田间尺度空间分布特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(9): 94-102.
Wang Weihua, Wang Quanjiu, Wu Xiangbo, et al. Characteristics of spatial distribution of soil water conductivity, air permeability, and heat conductivity in typical oasis croplands of Linze County at middle reaches of Heihe River[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(9): 94-102. (in Chinese)
- 13 Zu Y, Ma K, Zhang X. A fractal method for analyzing spatial heterogeneity of vegetation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(3): 333-337.
- 14 Massey Jr F J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1951, 46(253): 68-78.
- 15 Szymanski D M, Hise R T. E-satisfaction: an initial examination[J]. *Journal of Retailing*, 2000, 76(3): 309-322.

~~~~~

(上接第 131 页)

- 22 韩召迎,孟亚利,徐娇,等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析——以江苏省为案例[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 1034-1041.  
Han Zhaoying, Meng Yali, Xu Jiao, et al. Temporal and spatial different in carbon footprint of regional farmland ecosystem—taking Jiangsu province as a case[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 1034-1041. (in Chinese)
- 23 段华平,张悦,赵建波,等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 203-208.  
Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203-208. (in Chinese)
- 24 杨永辉,吴普特,武继承,等. 冬小麦光合特征及叶绿素含量对保水剂与 N 肥的响应[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 79-85.  
Yang Yonghui, Wu Pute, Wu Jicheng, et al. Responses of winter wheat photosynthetic characteristics and chlorophyll content to water-retaining agent and N fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 79-85. (in Chinese)
- 25 杨永辉,吴普特,武继承,等. 保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 19-26.  
Yang Yonghui, Wu Pute, Wu Jicheng, et al. Impacts of water-retaining agent on soil moisture and water use in different growth stages of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(12): 19-26. (in Chinese)