

白若琦,白朴,吴益伟,等. 种植业固碳减排潜力和技术对策研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(22):279-283.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.22.074

# 种植业固碳减排潜力和技术对策研究

白若琦<sup>1</sup>,白朴<sup>1</sup>,吴益伟<sup>2</sup>,朱相成<sup>1</sup>

(1. 温州科技职业学院,浙江温州 325006; 2. 浙江省农业科学院,浙江杭州 310021)

**摘要:**种植业是重要的人为温室气体排放源,也具有强大的碳汇功能。从农资投入、秸秆利用、土壤固碳等方面分析我国种植业的巨大减排潜力和固碳增汇空间,并结合笔者多年从事作物栽培的经验和国内外学者的研究成果,提出在选育和推广低碳作物品种、低碳种植模式的基础上,农作物产中采用以节肥、节水、节药为特征的低碳栽培措施,农作物产后通过秸秆还田、秸秆高温好氧堆肥化处理生产优质环保型有机肥或运用生物炭技术,实现种植业固碳、减排、增汇、增产、增效的目标。

**关键词:**种植业;固碳;减排;增汇;技术对策

**中图分类号:** S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)22-0279-04

种植业是全球具有碳源和碳汇双重功能的行业,农业生产产生的温室气体占全球人为导致的温室气体排放的近 30%<sup>[1-3]</sup>,同时,农田土壤也是地球的一个重要碳库,具有巨大固碳潜力<sup>[4]</sup>。据《中国统计年鉴(2014)》<sup>[5]</sup>,2014 年我国耕地面积为 1.35 亿  $\text{hm}^2$ ,占国土面积的 14.06%,全年农作物播种面积为 1.65 亿  $\text{hm}^2$ ,可见种植业的减排增汇对气候和环境有较大影响。顺应绿色、循环、低碳发展的大趋势,研究以种植业为核心的农田生态系统温室气体产生、释放和固定的机制,探明温室气体的源、汇机制及调控技术原理,研发农田生态系统温室气体减排、土壤固碳增肥、作物增产一体化关键集成技术,减少农田碳排放和增加种植业增汇效果,实现固碳于植物、藏碳于土壤,增加农作物产量,对缓解全球温室效应与环境压力,实现我国农业持续发展具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。本研究基于笔者从事农作物种植技术工作的经验,结合国内外学者的研究成果,分析种植业固碳减排增汇潜力和技术对策。

## 1 我国种植业减排增汇潜力分析

### 1.1 种植业具有巨大的减排潜力

1.1.1 石油农业特征明显,减排空间巨大 我国种植业长期过量使用化肥、农药、农膜等,石油农业特征明显。我国种植业化肥用量过大、农家肥用量不足、肥料利用率低,造成耕地理化结构变劣、地力下降、水体的富营养化、农田面源污染等<sup>[8-9]</sup>。据统计,1978—2014 年,我国农作物播种面积仅增加 0.15 亿  $\text{hm}^2$ ,而化学肥料施用量却从 884 万 t 增至 5 995 万 t,是 1978 年的 6.8 倍。化学投入品的过量使用导致我国农田的高碳排放,1993—2007 年,我国作物生产单位面积碳排放达 0.78 t  $\text{CE}/\text{hm}^2$ ,其中化肥、灌溉用电、燃油等化学品导致间接碳排放占 89%<sup>[10]</sup>,是我国农田温室气体排放的主体部

分。因此,通过减少化肥、农药等农资的使用实现碳减排具有很大的潜力<sup>[11]</sup>。一般认为,我国农田的氮肥利用率偏低,仅为 30% 左右<sup>[12-13]</sup>,据有关人员对浙江省杭州市西湖区和绍兴市新昌县茶园的调查,该茶园平均施氮肥量为 560  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,为收获生物量的 4 倍,利用率仅有 20% ~ 25%。据分析,如果将氮肥施用量在目前的基础上减少 28% ~ 47%,年均农田温室气体减排潜力达 41.7 ~ 70.1  $\text{Tg CE}^{[14]}$ 。我国种植业化学农药过度、不合理使用现象非常严重。2013 年,我国农药使用量达 180.19 万 t,单位面积用药量是世界平均水平的 2.5 倍<sup>[15]</sup>。用药不对口、不适时,高毒高残留低效农药仍在使使用,导致病虫害防治药效不佳、环境污染严重,且农药使用量和人工费用递增,直接或间接碳排放增加。通过调整作物种植模式和布局,推广低碳作物品种,实施节水、节肥、节药技术以及沼气利用等,可直接或间接减少温室气体排放。

1.1.2 设施种植高碳排放更加突出 我国是世界上设施栽培面积最大的国家,尤以设施蔬菜栽培发展迅速,2009 年我国温室设施总面积已达 410.9 万  $\text{hm}^2$ 。然而,设施栽培大棚又是我国农业碳排放最严重的地块。陈琳等研究表明,不同设施蔬菜碳排放量平均为 1 253.68  $\text{kg CE}/\text{hm}^2$ ,明显高于旱地粮食作物<sup>[16-17]</sup>。其原因归结如下:(1)化肥投入量大。由于投入成本大、集约化程度高,农民为了追求眼前经济效益超量施用化肥,其单季作物氮化肥量超出普通大田作物的数倍,有的高达十几倍,氮肥利用率远低于露地栽培。(2)加温过程排放大量  $\text{CO}_2$ 。我国大部分日光温室分布在北方,在深秋、冬季和早春季节气温较低,为满足蔬菜作物生长对温度的要求,须供热加温。(3) $\text{CO}_2$  严重亏缺限制碳汇作用。由于设施大棚栽培在密闭条件下进行,失去了与大气  $\text{CO}_2$  的交换。据测定,晴天大棚  $\text{CO}_2$  浓度可降至 100  $\mu\text{mol}/\text{mol}$  左右,严重影响光温条件的发挥和碳的固定。(4)土壤退化严重。由于劳动力价格的提高,现代农民不愿施用又脏又费力的有机肥,取而代之的是大量施用化学肥料,通常 4 ~ 5 年后出现土壤次生盐渍化、板结、连作障碍等土壤退化问题,严重影响土壤碳库的固碳作用。(5)设施栽培农产品质量差、收益降低。由于  $\text{CO}_2$  严重亏缺、超量施用化肥,导致碳、氮代谢失

收稿日期:2016-10-10

基金项目:浙江省重点软科学研究项目(编号:2012C25092)。

作者简介:白若琦(1987—),男,浙江温州人,硕士研究生,讲师,从事智慧农业和农业信息化研究与教学工作。E-mail:blackrq@qq.com。

通信作者:朱相成,博士,讲师,主要从事农田生态环境研究。

E-mail:workmail\_zhuxc@163.com。

调,不但产量低,而且品质差,蔬菜硝酸盐含量超标严重,影响设施栽培的经济效益和可持续发展。可见,我国设施栽培的高碳排放问题更加突出,其减排空间巨大<sup>[18-19]</sup>。

**1.1.3 作物秸秆减排潜力巨大** 我国是种植业大国,年产各类农作物秸秆总量达 6 亿 t,约占世界秸秆总产量的 20% ~ 30%,其中主要粮食作物年平均秸秆产量达到 4.9 亿 t。据赵建宁等估算,我国粮食秸秆露天焚烧量平均为 0.94 亿 t,约占粮食作物秸秆总量的 19%;粮食作物秸秆露天焚烧排放的 CO<sub>2</sub> 总量平均每年分别为  $9.19 \times 10^6$ 、 $1.07 \times 10^8$  t;排放的总碳量平均每年为  $3.32 \times 10^7$  t,其中稻谷、小麦、玉米、豆类秸秆露天焚烧释放的总碳量分别为  $9.88 \times 10^6$ 、 $9.93 \times 10^6$ 、 $11.14 \times 10^6$ 、 $2.22 \times 10^6$  t<sup>[20]</sup>。秸秆焚烧造成环境污染,减少土壤有机质含量,使农田土壤质地变劣、生产力下降。随着我国秸秆用作生活燃料或饲料的量不断减少,每年约有 2 亿 t 秸秆被随意丢弃,被微生物分解释放的 CO<sub>2</sub> 气体达 2.2 亿 t,还产生大量甲烷(CH<sub>4</sub>)。在稻田中,秸秆直接还田被认为会导致大量 CH<sub>4</sub> 排放,但也有很多研究表明,通过调整秸秆还田方式,比如采用旱直播方式进行秸秆还田<sup>[21]</sup>,在非稻季还田<sup>[22]</sup>或者先经过堆沤后还田<sup>[23]</sup>不会导致 CH<sub>4</sub> 排放的大量增加,而会减少因秸秆燃烧导致的碳排放。Yan 等估计通过改变秸秆还田时间,全球每年 CH<sub>4</sub> 排放可降低 4.10 Tg<sup>[24]</sup>,因此,实施农作物秸秆还田、回收利用,不仅对提高农田土壤肥力、水土保持和环境安全有益,而且与种植业向节能减排为特征的低碳、循环、生态和可持续方向发展息息相关。

## 1.2 种植业固碳增汇潜力巨大

**1.2.1 生物固碳** 农作物生物固碳对全球气候变化有着不容忽视的影响。植物通过光合作用将二氧化碳和水转化为有机物,并释放出氧气,这是绿色植物最基本的生化代谢过程,也是地球生物赖以生存的基本条件,是一种碳汇过程。农作物为人工栽培植物,且覆盖地表较大面积,通过光合作用合成自身所需的碳水化合物,转化成根、茎、叶、果实等同化物质,获得产量,同时将温室气体 CO<sub>2</sub> 以有机碳的形式固定在植物体内或土壤中。据报道,1991—2008 年我国农作物碳汇量呈现“蝙蝠型”波动上升趋势,由 1991 年的 55 345.2 万 t 增加至 2008 年的 74 386.8 万 t,增长了 34.41%<sup>[25]</sup>。生物固碳是最经济且副作用最少的固碳方法,且有较大的发展空间。

**1.2.2 土壤固碳** 土壤固碳是《京都议定书》认可的陆地生态系统固碳途径之一,在减缓气候变化中具有重要的地位,据估计,在全球每年 55 ~ 60 亿 t CO<sub>2</sub> 当量农业减排潜力中,89%的减排潜力须要通过提高土壤有机碳储量来实现<sup>[26]</sup>。虽然我国农耕地土壤有机碳库在过去 30 年间总体呈增加趋势,但与国外相比,我国耕作土壤有机碳密度还很低,土壤有机碳密度介于 0.81 ~ 12.68 kg/m<sup>2</sup>,平均为 3.15 kg/m<sup>2</sup>,平均比欧美低 1/3,有机碳库构建还有巨大的空间<sup>[27]</sup>。根据对我国 9 个省农田土壤的估算,0 ~ 100 cm 耕地土壤中的固碳潜力为 1 296.34 Tg C,相当于我国 2010 年固体化石燃料燃烧释放碳总量的 79.13%<sup>[28]</sup>。根据模型分析结果,如果采取管理措施,使农田系统碳投入以每年 1% 的速度增加时,土壤碳库会在 21 世纪末增加 2 倍<sup>[29]</sup>。可见,我国农田土壤固碳潜力巨大。我国农田过度或不适时翻耕,农家肥使用大幅度减少,都导致土壤有机质含量下降,土壤固碳量减少,通过技术

改进是增加土壤碳储量的发展方向。

## 2 技术对策

### 2.1 选育和推广低碳作物品种

不同作物碳汇、碳源特性不同,同种作物的不同品种的碳汇、碳源特性也有区别。产量潜力高、种植根系庞大、抗逆性强的作物品种,CO<sub>2</sub> 同化能力强、养分利用效率高、病虫害轻,属低碳类型品种<sup>[30]</sup>。按照低碳、增产的原则,以作物新品种和骨干亲本为研究对象,以作物高产、资源高效、低 CH<sub>4</sub> 和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)排放为主要指标,培育可在我国典型农区推广应用的新型固碳高产作物,可为我国种植业固碳减排增汇创造种植条件。我国是水稻生产大国,水稻产量约占世界的 30%。我国已成功育成和推广超级稻,其产量潜力高、根系发达、吸肥能力强、氮肥利用率高、生产单位产量稻谷的需肥量和 CH<sub>4</sub> 排放量均低于常规稻和普通杂交稻,且叶片功能期长、光合能力强、同化 CO<sub>2</sub> 的碳汇能力较强<sup>[31]</sup>。大面积推广应用我国自主选育成功的超级杂交稻组合是实现稻田低碳生态高效栽培的重要途径。旱地固碳减排效果对环境的影响不可忽略。筛选和推广碳汇能力强、碳排放相对较弱的优良旱地作物品种,配套开发增汇减排旱作技术,突破固碳减排高产作物品种和配套耕作栽培等关键技术。同时配套研究作物的接茬方式、育苗移栽、播种期、适宜密度、合理施肥、化学调控和主要病虫害过程对产量、品质和碳排放的综合影响,提高农田农产品产量和生产效益以及大幅度减少农田生产过程中的温室气体排放等。

### 2.2 推广低碳种植模式

按照兼顾提高农产品品质、效益和增汇减排的原则,结合特定区域的气候特点、土壤性质,调整农田作物结构,增加一些碳汇系数较高农作物的种植面积,推广适合当地的低碳节能种植模式,形成良性循环农田生态系统<sup>[32-34]</sup>。笔者在浙江省温州市推广适合当地的大棚番茄—甜玉米—晚稻、鲜食玉米—晚稻—蔬菜、小麦—甜玉米—晚稻等稻田高产高效种植模式,提高了稻田光、温资源利用率和“碳汇”效果<sup>[35]</sup>。轮作可提高农田土壤结构和养分供应能力,也可减少作物病虫害发生。杨晓琳在中科院栾城试验站开展了替代轮作种植模式的田间定位研究表明,合理的替代轮作模式有明显的节水效果,5 种植模式年均周年耗水量由大到小依次为麦玉模式(724.5 mm) > 粮棉油模式(647.4 mm) > 粮油模式(615.0 mm) > 粮棉薯模式(560.6 mm) > 棉花连作模式(522 mm)<sup>[36]</sup>。冬季空白田种植绿肥可增加地表作物覆盖,增加对大气二氧化碳的生物固定,也增加土壤有机质含量和碳固定数量<sup>[37-38]</sup>。农田作物与动物的立体搭配种养模式,也是提高农田资源的利用效率、减少温室气体排放的模式。如鸭稻共作种养模式,利用雏鸭旺盛的杂食性,起到除草和基本消灭稻飞虱、稻蜡象、稻象甲、稻纵卷叶螟等水稻害虫的作用,利用鸭不间断的活动刺激水稻生长,增加稻田水溶解氧含量,减少 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[39-41]</sup>。

### 2.3 低碳栽培

**2.3.1 低碳施肥** 施肥是农作物增产增效的必要措施,也是减排增汇的主要环节<sup>[42]</sup>。研究明确特定农田的土壤母质、土壤熟化程度、理化性状、供肥特性,结合特定种植模式和特定

作物的养分需求特点,实施既兼顾产量、效益,又注重减少环境面源污染、温室气体排放的最佳施肥方案,运用低碳高效农田培肥技术,实施精确定量测土配方施肥,可较大幅度减少化肥,尤其是化学氮肥的用量。随着我国信息技术和农机装备的不断发展,利用遥感、全球定位系统和地理信息系统的 3S 技术,实施精准施肥,以减少种植业化肥用量和提高肥料利用率是以后的发展方向<sup>[43]</sup>。施用肥料的类型与作物的产量、碳源碳汇密切相关<sup>[44]</sup>。结合不同地区农田的养分状况和供肥特点,按照不同作物、不同类型土壤的需肥特点配制的专用肥,可提高肥料的利用率和作物产量。有机肥与无机肥配合施用可以提高肥料养分效率,并起到固碳培肥和减少温室气体排放的效果。按照相应的标准,生产有机、绿色、无公害农产品,可减少或不用化学肥料,增加有机肥的用量,可促进农田土壤的良性循环和有机碳的累积。氮肥利用率低、易流失或被反硝化为  $\text{N}_2\text{O}$  而被排放,生产上应适当减少化学氮肥用量,改氮肥表施为深施。段智源等研究报道,与传统施肥方法相比,春玉米用硫包衣尿素分别使温室气体排放总量、单位玉米产量排放、万元净产值碳排放降低 37.8%、40.5%、47.3%,用尿素添加双氰胺处理分别使上述指标降低 36.5%、38.6%、45.9%<sup>[45]</sup>。据报道,使用甲烷抑制剂也能显著抑制农田  $\text{CH}_4$  的排放,因地制宜合理增施菌渣、沼肥可改良土壤和提升地力。长效碳酸氢铵对  $\text{CO}_2$  的吸收和固定率达到 86%,其中植物吸收  $\text{CO}_2$  10% 以上,土壤固定  $\text{CO}_2$  76%。土壤中施用长效碳酸氢铵的  $\text{CO}_2$  排放量比施用尿素低 16.9%。研究表明,随着土壤深度的增加,土壤中生成稳定碳酸钙和碳酸镁的量也不断增加,特别是在深层土壤 50 cm 以下,有更多的碳酸钙和碳酸镁形成。可见,利用碳酸氢铵、碳酸氢钾等碳酸氢盐的碳酸氢根离子可成为减排固定  $\text{CO}_2$  和改善生态环境的一条可行途径。

**2.3.2 低碳管水** 水分为作物生长所必需的资源,节水栽培可以科学利用水资源,同时减少机灌的电力需求,间接减少碳排放。选择耐旱作物,研发作物全生育期的需水规律,形成既能满足作物生长发育对水分的需求,又能节水、减少农田  $\text{CH}_4$  等温室气体排放的作物管水措施。淹水稻田为温室气体  $\text{CH}_4$  的主要排放源,据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,简称 IPCC)估算,稻田  $\text{CH}_4$  排放约占全球  $\text{CH}_4$  排放的 12%<sup>[46]</sup>。水稻种植面积占我国作物播种面积的 18.6%,我国稻田  $\text{CH}_4$  排放是全球稻田  $\text{CH}_4$  排放的重要部分。水稻是湿生作物,又是种植业耗水量最大、节水空间最大的作物,通过采取强化栽培、超前搁田、湿润灌溉、间歇灌溉的节水措施,可调节水稻群体、促进水稻根系发育、提高土壤氧化还原电位  $\text{CH}_4$  大量排放、减少节水和减少机灌所需的能源引起的间接排放,国内外大量研究表明,采用间歇灌溉等节水灌溉模式可降低稻田  $\text{CH}_4$  排放 15%~72%<sup>[47]</sup>。笔者提出实践多年的杂交水稻“六五始控”超前隔田技术<sup>[48-49]</sup>,在生产上大面积应用,其搁田时间比常规栽培提早,搁田时间延长,不仅有效抑制了稻株无效分蘖的生长,提高了稻田的群体质量,实现稳产高产,也缩短了稻田淹水的时间和减少耗水量。结合水稻本田全生育期多数时间保持湿润而无水层的管水技术,节水效果更加明显,而且减少稻田全生育期还原性物质的形成,既提高了水稻全生育期根

系的活力,也减少了  $\text{CH}_4$  排放<sup>[50]</sup>。针对不同的旱地作物,选用抗旱品种,采取抗旱锻炼、增施有机肥、秸秆覆盖、地膜覆盖等措施,减少作物全生育期的用水量,实现节水减排增产的目标。随着我国气象预报精准度提高,利用降水信息,结合需水规律和水分需求弹性,采取人工灌溉与自然降水相结合的管水方式,充分利用自然降水,可减少人工灌溉的耗水、耗能、耗电。

**2.3.3 病虫害低碳防治** 农作物病虫害的低碳防治,应遵循以农业防治为主,提倡物理防治、生物防治、化学防治为辅的原则。农业防治是低碳防治的基础。通过优化种植模式,选用抗性强的农作物品种,以及轮作、中耕、除草等农业措施减少病源、虫源,结合健身栽培、适度密植、调节群体等栽培措施,减少田间郁闭度和降低田间湿度,减轻病虫害发生,从而减少农药用量和施药用工。应大力推广生物防治、物理防治替代化学农药防治,减少化学农药对环境及农产品的不良影响。银灰色膜、防虫网、黄板、频振式杀虫灯等物理防治措施在生产上推广效果良好。我国利用大红瓢虫防治柑橘吹绵蚧,用白僵菌防治大豆食心虫和玉米螟,用金小蜂防治越冬红铃虫,用赤小蜂防治螟虫等均获得成功,生物防治对环境的影响小,应加大推广力度。生产上推广稻鸭共育、稻鱼蛙共养等技术不仅有效防治稻田的虫害和草害,也提高了农田的产出和效益。化学农药防效好、药效快,仍是作物病虫害防治的重要手段。在严格掌握防治适期和适当放宽防治指标的基础上,选用高效、低毒、低残留农药替代低效、高毒、高残留农药。应尝试引进 3S 系统实施精准施药,推广无人机施药技术,提高工效和减少成本和环境污染<sup>[51]</sup>。

## 2.4 农作物秸秆综合利用

农作物秸秆还田对固碳减排具有双重性,它可充实稻田土壤碳库,也会引起  $\text{CH}_4$  等温室气体排放增加<sup>[52]</sup>。秸秆还田可以消耗部分农作物秸秆,但涉及切碎、腐烂等机械和生物化学等过程,也常常对土壤结构以及接茬作物对养分吸收造成不良影响,秸秆直接还田的化感作用对后茬作物的影响也不能忽略。现阶段,除了一些草本作物的秸秆可直接还田外,大量农作物秸秆直接还田尚不现实。将秸秆等有机废弃物进行高温好氧堆肥化处理生产优质环保型有机肥已成为秸秆利用的重要途径之一。土壤耕作层是固碳的主要土壤层,土壤有机碳含量提高可同时提高土壤肥力,开发有机无机配合施肥-保护性耕作等高效固碳增肥技术,开发固碳减排调理剂和增效剂等,可提高土壤碳库稳定性,减缓土壤生物物质腐殖化过程中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等温室气体的产生和释放。应以增加有机碳输入量和减少有机碳矿化为目标,研究土壤碳的固定、积累与周转机制,突破我国农田土壤增碳关键技术,在农业生产上示范推广。如果将农作物秸秆等生物物质低温碳化转化为微生物难降解、稳定性长达几千甚至上万年的生物炭,就可以有效地减缓土壤中生物物质腐殖化过程中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等温室气体的产生和释放,提高土壤中的碳汇<sup>[53]</sup>。向土壤中添加生物炭可以提高土壤的物理化学性质和渗水性,减少土壤中氮、磷等营养元素的流失,降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放,促进土壤中有益微生物的生长,提高土壤肥力<sup>[54]</sup>。传统的生物炭主要通过泥窑、砖窑等各类碳窑制备,其能量利用效率低下,而且会产生许多污染物。应研发先进新型农林废弃物为原料的废弃生物物质裂解技术,制备优质生物炭和提高生物炭产率,减少污染排放和

碳氮损失,使农作物秸秆变废为宝,充分发挥种植业的低碳功能,实现种植业固碳减排增汇增产增效的目标<sup>[53]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 王立刚,邱建军. 农业源温室气体监测技术规程与控制技术研究[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [2] Bennetzen E H, Smith P, Porter J R. Decoupling of greenhouse gas emissions from global agricultural production: 1970 – 2050 [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 763 – 781.
- [3] Wang X H. Changes in CO<sub>2</sub> emissions induced by agricultural inputs in China over 1991 – 2014[J]. *Sustainability*, 2016, 8(5): 414 – 426.
- [4] Smith P. Agricultural greenhouse gas mitigation potential globally, in Europe and in the UK, what have we learnt in the last 20 years? [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 35 – 43.
- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴(2014)[M]. 北京:中国统计出版社, 2015:396.
- [6] Stavi I, Lal R. Agriculture and greenhouse gases, a common tragedy: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(2): 275 – 289.
- [7] 叶宏宝,石晓燕,李 冬,等. 气候变化对浙江水稻生产影响的集合模拟分析[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(7): 1183 – 1192.
- [8] 杨 帆,孟远夺,姜 义,等. 2013 年我国种植业化肥施用状况分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 217 – 225.
- [9] Zhang X Y, Xu X, Liu Y L, et al. Global warming potential and greenhouse gas intensity in rice agriculture driven by high yields and nitrogen use efficiency[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(9): 2701 – 2714.
- [10] 杨 帆,孟远夺,姜 义,等. 2013 年我国种植业化肥施用状况分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 217 – 225.
- [11] 米松华,黄祖辉,朱奇彪,等. 稻田温室气体减排成本收益分析[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(4): 707 – 716.
- [12] 闫 湘,金继运,何 萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 450 – 459.
- [13] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915 – 924.
- [14] Chai R, Niu Y, Huang L, et al. Mitigation potential of greenhouse gases under different scenarios of optimal synthetic nitrogen application rate for grain crops in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, 96(1): 15 – 28.
- [15] 陈晓明,王程龙,薄 瑞. 中国农药使用现状及对策建议[J]. *农药科学与管理*, 2016, 37(2): 4 – 8.
- [16] 陈 琳,闫 明,潘根兴. 南京地区大棚蔬菜生产的碳足迹调查分析[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1791 – 1796.
- [17] Cheng K, Yan M, Nayak D, et al. Carbon footprint of crop production in China: an analysis of national statistics data [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(3): 422 – 431.
- [18] Zou X, Li Y, Li K, et al. Greenhouse gas emissions from agricultural irrigation in China [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(2): 295 – 315.
- [19] Vourdoubas J. Overview of the use of sustainable energies in agricultural greenhouses[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2016, 8(3): 36.
- [20] 赵建宁,张贵龙,杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4): 812 – 816.
- [21] 杭晓宁. 稻作方式和秸秆还田对稻麦产量和温室气体排放的影响研究[D]. 南京:南京农业大学,2015.
- [22] Xu H, Cai Z C, Li X P, et al. Effect of antecedent soil water regime and rice straw application time on CH<sub>4</sub> emission from rice cultivation [J]. *Soil Research*, 2000, 38(1): 1 – 12.
- [23] Corton T M, Bajita J B, Grospe F S, et al. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in central Luzon (Philippines) [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1/2/3): 37 – 53.
- [24] Yan X Y, Akiyama H, Yagi K, et al. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change guidelines [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2): 627 – 634.
- [25] 李 波,张俊飏. 我国农作物碳汇的阶段特征与空间差异研究[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(5): 1229 – 1233.
- [26] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 901 – 914.
- [27] 张旭博,孙 楠,徐明岗,等. 全球气候变化下中国农田土壤碳库未来变化[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(23): 4618 – 4627.
- [28] 杨 柯. 我国典型农耕地土壤固碳潜力研究[D]. 北京:中国地质大学,2016.
- [29] Khaliq A, Gondal M R, Matloob A, et al. Chemical weed control in wheat under different rice residue management options[J]. *Pakistan Journal of Weed Science Research*, 2013, 19(1): 1 – 14.
- [30] Ma K E, Qiu Q, Lu Y H. Microbial mechanism for rice variety control on methane emission from rice field soil[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3085 – 3095.
- [31] Jiang Y, Wang L L, Yan X J. Super rice cropping will enhance rice yield and reduce CH<sub>4</sub> emission: a case study in Nanjing, China [J]. *Rice Science*, 2013, 20(6): 427 – 433.
- [32] 罗怀良. 中国农田作物植被碳储量研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 692 – 697.
- [33] 米松华,黄祖辉,朱奇彪,等. 农户低碳减排技术采纳行为研究[J]. *浙江农业学报*, 2014, 26(3): 797 – 804.
- [34] Yao Z S, Zheng X H, Wang R, et al. Nitrous oxide and methane fluxes from a rice – wheat crop rotation under wheat residue incorporation and no – tillage practices [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79: 641 – 649.
- [35] 白 朴,张国平,曾 玮,等. 稻田周年减排增汇技术研究[J]. *上海农业学报*, 2015, 31(2): 131 – 136.
- [36] 杨晓琳. 华北平原不同轮作模式节水减排效果评价[D]. 北京:中国农业大学,2015.
- [37] Kim S Y, Lee C H, Gutierrez J, et al. Contribution of winter cover crop amendments on global warming potential in rice paddy soil during cultivation [J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1/2): 273 – 286.
- [38] Chai Q, Qin A Z, Gan Y T, et al. Higher yield and lower carbon emission by intercropping maize with rape, pea, and wheat in arid irrigation areas [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 535 – 543.
- [39] 章家恩. 近十多年来我国稻鸭共作生态农业技术的研究进展与展望[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 70 – 79.
- [40] Hu Z, Wu S, Ji C, et al. A comparison of methane emissions following rice paddies conversion to crab – fish farming wetlands in southeast China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(2): 1505 – 1515.

李 岩,尚士友,王晓娟,等. 西乌珠穆沁典型草原植被盖度空间异质性研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(22):283-288.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.22.075

# 西乌珠穆沁典型草原植被盖度空间异质性研究

李 岩<sup>1</sup>, 尚士友<sup>2</sup>, 王晓娟<sup>1</sup>, 臧 琛<sup>3</sup>, 德力格尔<sup>4</sup>

(1. 内蒙古电子信息职业技术学院电子工程系, 内蒙古呼和浩特 010070; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018;  
3. 内蒙古工业大学工程训练中心, 内蒙古呼和浩特 010051; 4. 内蒙古西乌旗草原工作站, 内蒙古锡林郭勒盟 026200)

**摘要:**采用地学统计方法,以西乌珠穆沁典型草原 3 类不同地貌的 3 个试验区中植被盖度为研究对象,探讨其空间结构和异质性。经研究发现,3 类地貌试验样地的植被盖度均值较为接近,在 32.99%~40.77% 之间,其变异系数值均小于 10%,属于弱变异性范围。3 个试验样地植被盖度的拟合模型决定系数在 0.60~0.71 之间,拟合度较好;根据  $C_0/(C+C_0)$  值可知,随机因素在 3 个样地植被盖度的空间变异中所起的作用的权重顺序为低山丘陵样地>坡地样地>波状高平原样地;3 类不同地貌试验样地的结构比  $[C/(C+C_0)]$  均大于 75%,植被盖度均表现出较强的空间相关性,且由空间自相关部分引起的空间异质性占到总空间异质性的 80% 以上;3 个试验样地中植被盖度连续性最好的是低山丘陵地貌样地,其次是坡地地貌试验样地,最后是波状高平原地貌样地。3 个试验样地均表现出明显的各向异性,空间格局差异明显。经克里金空间插值后得到 3 个样区植被盖度的空间分布图,并对植被盖度的分布做了定量研究。

**关键词:**典型草原;植被盖度;地统计学;空间异质性;遥感;半方差函数;草地沙漠化治理

**中图分类号:** S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)22-0283-06

植被盖度是景观环境适宜程度的指示因子,是自然环境变化和人类活动所引起的景观演变过程的综合结果,因此植被盖度不仅是群落结构的一个重要参数,也是土地退化特征

收稿日期:2016-05-19

基金项目:国家自然科学基金(编号:41061023,41261050);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(编号:NJZY313)。

作者简介:李 岩(1981—),女,内蒙古赤峰人,博士,副教授,主要从事信息监控技术研究。E-mail:nmliyan@126.com。

通信作者:尚士友,教授,博士生导师,主要从事 3S 技术和环境监控与信息技术方向研究。E-mail:shangshiyu@163.com。

的一个直接的主导性表征<sup>[1]</sup>,更是指示生态系统变化的重要指标。栗钙土层是典型草原土壤的主要组成结构,是在自然因素和人为因素的共同作用下,经过漫长的历史过程协同演化而来的,具有栗色腐殖层和明显钙积层的地带性土壤。植被盖度存在一定的空间异质性,即不同的空间位置上植被的盖度存在一定的差异,土壤与植被的空间异质性既作为一种原因也作为一种结果在植物群落中广泛存在着<sup>[2-5]</sup>。

伴随着近几年遥感技术的飞速发展,利用该技术监测植被的相关特征数据,已经取得一定的研究成果,并已应用在实践中。但介于目前研究技术的发展水平,直接利用快捷的遥感技

[41] 梁开明,章家恩,林田安,等. 一稻两鸭共作对稻田土壤养分动态的影响[J]. 生态环境学报,2014,23(5):769-776.

[42] 朱相成. 增密减氮对东北水稻产量和氮肥效率及温室气体排放的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2015.

[43] 朱利群,王春杰,陈利根,等. 长江中下游稻麦轮作农田不同施肥措施的固碳潜力分析[J]. 浙江农业学报,2016,28(7):1249-1261.

[44] Deng F, Wang L, Ren W J, et al. Enhancing nitrogen utilization and soil nitrogen balance in paddy fields by optimizing nitrogen management and using polyaspartic acid urea [J]. Field Crops Research, 2014, 169:30-38.

[45] 段智源,李玉娥,万运帆,等. 不同氮肥处理春玉米温室气体的排放[J]. 农业工程学报,2014(24):216-224.

[46] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change [M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2014.

[47] Hussain S, Peng S, Fahad S, et al. Rice management interventions to mitigate greenhouse gas emissions: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(5): 3342-3360.

[48] 白 朴,项 雄,王元辉,等. 超级稻的特征特性与配套栽培技术研究[J]. 种子,2006,25(4):98-101.

[49] Bai P, Pang B R. Studies on water-saving and high-yield cultivation techniques of super rice [J]. Biotechnology, 2013, 7(10):425-428.

[50] 邵美红,孙加焱,阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述 [J]. 浙江农业学报,2011,23(1):181-187.

[51] 白 朴,金瑜雪,应苗苗,等. 低碳农业发展对策探索与研究 [M]. 北京:中国农业科学出版社,2016.

[52] Lehmann J. A handful of Carbon [J]. Nature, 2007, 447(7141): 143-144.

[53] 吕宏虹,宫艳艳,唐景春,等. 生物炭及其复合材料的制备与应用研究进展[J]. 农业环境科学学报,2015,34(8):1429-1440.

[54] Zhang Z N, Chen G F, Sun H F, et al. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost [J]. Bioresource Technology, 2016, 200:876-883.

[55] Liu X Y, Qu J J, Li L Q, et al. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N<sub>2</sub>O emission in rice paddies? - A cross site field experiment from South China [J]. Ecological Engineering, 2012, 42(9):168-173.