

# 浅埋滴灌条件下优化施氮对西辽河平原 春玉米田碳、氮足迹的影响

邵继承, 李锐, 杨恒山, 张玉芹, 张瑞富

(内蒙古民族大学农学院, 内蒙古自治区饲用作物工程技术研究中心, 内蒙古 通辽 028042)

**摘要:** 为探究西辽河平原浅埋滴灌条件下优化施氮对春玉米农田生态系统碳氮足迹的影响, 于 2019—2020 年在内蒙古通辽市科尔沁区农业高新技术示范园区连续 2 年进行定位试验, 以传统漫灌常规常量追氮为对照(CK), 设置浅埋滴灌下常量追氮( $T_1$ )和优化追氮( $T_2$ : 70% 常量追氮)2 个处理, 研究不同灌溉方式和氮肥管理对春玉米产量、农田经济效益和农田碳氮足迹的影响。结果表明, 相比于传统漫灌, 浅埋滴灌下  $T_1$  和  $T_2$  处理在增加玉米产量的同时提高农田经济效益( $P < 0.05$ )。土壤呼吸  $CO_2$  碳排放是农田碳足迹主要来源, 占比 43%~44%, 化肥是农业生产资料碳排放主要来源, 占生产资料碳排放总量 36%~43%; 氮肥施用是输入氮足迹的主要组成部分, 占比 93%~95%。农田生态系统净碳值浅埋滴灌下  $T_1$  和  $T_2$  处理无显著差异, 分别较传统漫灌 CK 处理增加 15.43%, 9.29%; 碳效率浅埋滴灌下优化追氮  $T_2$  处理最高, 较 CK 处理提高 10.63%。氮素平衡浅埋滴灌下优化追氮  $T_2$  处理最接近零点, 显著低于  $T_1$  和 CK 处理( $P < 0.05$ ); 氮投入有效利用水平  $T_2$  处理最高, 显著高于 CK 处理( $P < 0.05$ )。综合来看, 浅埋滴灌下优化追氮  $T_2$  处理降低西辽河平原农田生态系统碳、氮排放, 提高碳效率和氮投入有效利用水平, 保证玉米产量和经济效益, 是西辽河平原春玉米兼顾高产、高效和生态的水氮管理模式。

**关键词:** 浅埋滴灌; 优化施氮; 春玉米; 碳足迹; 氮足迹

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0278-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.038

## Effects of Optimal Nitrogen Application on Carbon and Nitrogen Footprints of Spring Maize Fields Under Shallow Buried Drip Irrigation in the Xiliaohe Plain

TAI Jicheng, LI Rui, YANG Hengshan, ZHANG Yuqin, ZHANG Ruifu

(College of Agronomy, Inner Mongolia Minzu University, Engineering Research

Center of Forage Crops of Inner Mongolia Autonomous, Tongliao, Inner Mongolia Autonomous 028042)

**Abstract:** In order to explore the impact of optimized nitrogen application on the carbon and nitrogen footprint of spring maize farmland ecosystem under shallow buried drip irrigation in the Xiliaohe Plain, a 2-year continuous positioning experiment was used from 2019—2020 in the Agricultural High-tech Demonstration Park in Horqin District, Tongliao City, Inner Mongolia. The conventional constant nitrogen topdressing with flood irrigation was used as the control (CK). Two treatments were set up under shallow buried drip irrigation, constant nitrogen topdressing ( $T_1$ ) and optimized nitrogen topdressing ( $T_2$ : 70% of constant nitrogen topdressing), to study the effects of different irrigation and nitrogen fertilization methods on spring maize yield, economic benefits, carbon and nitrogen footprint. The results showed that compared with CK, the  $T_1$  and  $T_2$  increased the maize yield, while improved the economic benefits of farmland ( $P < 0.05$ ). Soil respiration  $CO_2$  emissions were the main source of farmland carbon footprint, accounting for 43%~44%. Chemical fertilizers were the main source of carbon emissions from agricultural production materials, accounting for 36%~43% of the total carbon emissions from production materials; nitrogen fertilizer application is the input of nitrogen footprint, accounting for 93%~95%. The net carbon values of farmland

收稿日期: 2021-05-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300805); 国家自然科学基金项目(31860353); 内蒙古自然科学基金项目(2018LH03007, 2018LH03012)

第一作者: 邵继承(1977—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 副教授, 主要从事作物高产栽培与资源高效利用研究。E-mail: taijicheng19771013@126.com

通信作者: 杨恒山(1967—), 男, 内蒙古兴和人, 博士, 教授, 主要从事作物高产栽培与资源高效利用研究。E-mail: yanghengshan2003@aliyun.com

ecosystem under shallow buried drip irrigation had no significant difference between  $T_1$  and  $T_2$  treatments, but compared with CK, both were increased by 23.79% and 32.67%, respectively. The carbon efficiency of  $T_2$  treatment was the highest, which was significantly higher than  $T_1$  and CK treatments ( $P < 0.05$ ). The nitrogen balance in  $T_2$  was the closest to zero, which was significantly lower than  $T_1$  and CK ( $P < 0.05$ ). The effective nitrogen input level was the highest in  $T_2$ , which was significantly higher than  $T_1$  and CK ( $P < 0.01$ ). On the whole, the optimized nitrogen topdressing  $T_2$  treatment under shallow buried drip irrigation reduced the carbon and nitrogen emissions of the farmland ecosystem in the Xiliao River Plain, improved the carbon efficiency and the effective utilization of nitrogen input, and ensured the maize yield and economic benefits. It is the optimal water and nitrogen management strategy for spring maize in the Xiliao River Plain, taking into account the high yield, high efficiency and ecology.

**Keywords:** shallow buried drip irrigation; optimize nitrogen application; spring maize; carbon footprint; nitrogen footprint

由人类活动造成的碳氮排放加剧全球温室效应已成为不争的事实,温室效应引起的气候变化正日益受到国际社会的高度关注。农业生产是重要的碳氮排放源<sup>[1]</sup>,如何有效降低农田生态系统碳氮排放已成为各国政府和科学家关注的焦点。农田生态系统在碳氮循环中具有“源”与“汇”的重要作用,农田生态系统碳氮排放除受到气候、土壤、植被和人为扰动等影响外,在很大程度上还受到农田管理措施的影响。因此,为实现高产、生态和可持续的农业,探索农田生态系统碳氮平衡规律和研究高产减排技术对于制定缓解气候变暖政策具有重要的指导意义。

准确客观评估农田生态系统碳氮排放是实现农业可持续发展的第一步,而碳足迹和氮足迹就是系统分析和评估碳氮排放的指标,且已得到学者广泛的认同和应用<sup>[2]</sup>。我国是一个人口大国,通过高氮肥投入来提高系统生产力以保证粮食安全是最有效的方法之一,高氮肥的投入在增加生物量提高产量的同时,也增加土壤  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放<sup>[3]</sup>,这无疑给生态环境带来压力。有研究<sup>[4]</sup>表明,在农田生态系统中化肥是农业生产资料投入的主要碳源,占生产资料总碳量的 73.5%~77.4%;也有研究<sup>[5]</sup>认为,灌溉用电碳投入最多,占生产资料总碳量的 58.0%~77.1%,此差异与研究作物和农业生产资料投入比例不同有关。土壤呼吸直接碳排放是农田碳排放的重要部分<sup>[6]</sup>,有研究<sup>[3]</sup>表明,土壤呼吸  $\text{CO}_2$  累积排放量随施氮量增加而增加。氮足迹模型是在全球氮污染日趋严重的情况下提出来的,受到研究者的关注<sup>[7]</sup>。相比而言,国内对于农田氮足迹的研究相对较少,现有的报道<sup>[5,8]</sup>认为,氮肥施用是增加农田氮足迹的主要原因。氮肥是土壤排放  $\text{N}_2\text{O}$  的主要氮源, $\text{N}_2\text{O}$  排放总量的 80%~95%来源于灌溉施肥,且施氮量越多, $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量越多<sup>[9]</sup>。可见,水氮管理对农田碳氮排放影响显著,优化水氮管理是西辽河平原春玉米种植体系固碳减排的重要措施。

浅埋滴灌是西辽河平原近年来应用推广的一项新型节水灌溉方式,2018 年列为内蒙古自治区农业主推技术之一,2019 年该成果获全国农牧渔业丰收一等奖<sup>[10]</sup>。到目前为止,仅内蒙古累计推广面积达到 90 万  $\text{hm}^2$  以上。在这种背景下,加强浅埋滴灌条件下优化施氮对春玉米田碳氮足迹的影响研究对于准确评价节水灌溉新技术应用后所带来的环境效应具有重要科学意义。然而,目前针对浅埋滴灌方式下农田生态系统碳氮排放的研究却鲜有报道。因此,本文以西辽河平原春玉米农田生态系统为研究对象,以传统漫灌常规常量追氮为对照,在浅埋滴灌下设置常量追氮和优化追氮 2 个处理,研究其对春玉米农田生态系统碳氮足迹的影响,分析不同灌溉方式和水氮管理措施下西辽河平原春玉米生产综合效应,从而进一步优化水氮管理,为保证春玉米持续生产和固碳减排提供理论支撑和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究边界

本研究碳足迹和氮足迹边界包括从春玉米播种到收获整个生育期内生产活动所排放的碳和氮。碳足迹包括投入种子、化肥、农药、电力和农业机械及耕地等生产资料间接碳排放,以及农田土壤呼吸直接碳排放( $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$ )。氮足迹主要来源种子、化肥、农业机械能源以及土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放等生产资料氮输入。农田生态系统碳、氮边界见图 1。

### 1.2 试验区概况

试验地位于内蒙古通辽市科尔沁区农业高新科技园,该区属典型的温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季短促温热,降水集中,秋季凉爽,冬季干冷。年均气温  $6.8\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$  活动积温约  $3\ 200\text{ }^\circ\text{C}$ ,无霜期 145 天左右,年均日照时间  $3\ 000\text{ h}$  左右,年均降水量  $390\text{ mm}$ ,2019 年、2020 年春玉米生育期内月降雨量见图 2。试验地土壤为灰色草甸土,播前土壤有机质含量  $8.83\text{ g/kg}$ ,碱解氮含量  $30.07\text{ mg/kg}$ ,速效磷

含量 11.21 mg/kg,速效钾含量 77.02 mg/kg。

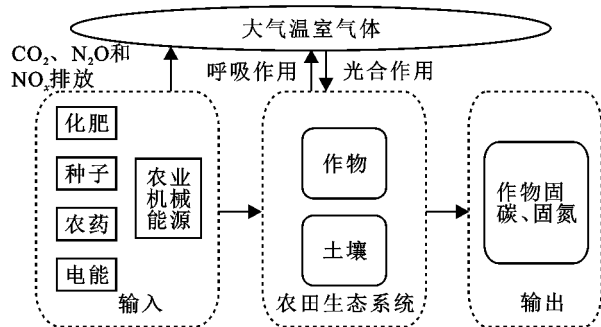
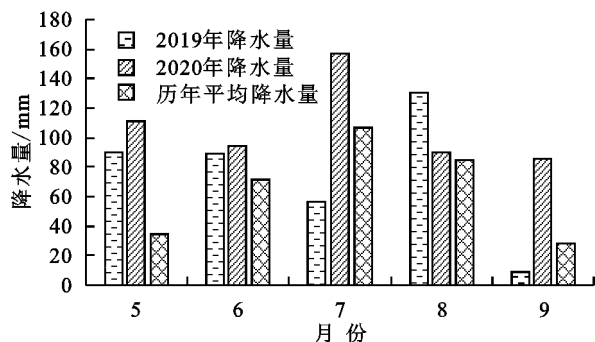


图 1 农田生态系统碳、氮足迹边界示意



注:历年平均降水量为 1960—2020 年。

图 2 玉米生育期内月降水量

### 1.3 试验设计

以当地传统漫灌常规常量追氮(CK)为对照,浅埋滴灌下设置常量追氮( $T_1$ )和优化追氮( $T_2$ :70%常量追氮)2个处理。采用大区对比试验,小区面积长 120 m×宽 7.2 m,设置 3 次重复,随机排列。浅埋滴灌处理之间间隔 1 m,传统漫灌与浅埋滴灌处理间距 15 m。供试玉米品种为“农华 101”,大小垄(40,80 cm)种植,浅埋滴灌处理将滴灌带埋于小垄中间,深度 2~4 cm,种植密度 7.5 万株/hm<sup>2</sup>,各处理底肥施用硫酸钾和磷酸二铵,用量一致,播种时一次性施入,换算成纯氮、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和 K<sub>2</sub>O 纯量分别为 35,90,45 kg/hm<sup>2</sup>。各处理追肥施用尿素,CK 处理在拔节期一次性人工开沟撒施纯氮 300 kg/hm<sup>2</sup>,传统漫灌灌水 4 次,总灌溉量 4 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;  $T_1$  处理追施纯氮 300 kg/hm<sup>2</sup>,  $T_2$  处理追施纯氮 210 kg/hm<sup>2</sup>,在拔节期、大喇叭口期、吐丝期按 3:6:1 比例随水滴施,生育期内滴灌处理灌水 6 次,总灌溉量 2 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。2019 年 5 月 1 日播种,9 月 29 日收获。2020 年 5 月 2 日播种,10 月 1 日收获。

### 1.4 测定指标与方法

**1.4.1 土壤气体排放** 农田土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 采用静态箱—气相色谱法测定,静态箱由不锈钢材质制成,外表包裹保温膜,保证气体采集时箱内温度恒定。静态箱由箱体和底座 2 部分构成,箱体规格 50 cm×50 cm×50 cm(长×宽×高),内部装有风扇,用于混匀箱体内空气,底座规格 50 cm×50 cm×10 cm(长×宽×高),入土 10 cm 于播种后固定在小区内,

底座内无杂物,春玉米生长季人工除草,底座上部设有水槽,采气时箱体和底座之间用水密封。玉米整个生长季,气体采集 7 天 1 次,追肥灌溉后 1 天采集 1 次,1 周后恢复 7 天 1 次,取样时间为上午 9:00—11:00,箱体密封后,在 0,10,20,30 min 分别用注射器采集连续 4 个样品,同时记录箱体内温度,采样后气体密封保存,送实验室进行测定。CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 气体浓度用气相色谱仪测定,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 使用 FID 检测器,温度为 200 ℃,N<sub>2</sub>O 使用 ECD 检测器,温度为 300 ℃,色谱柱为 80/100 目的 SS-2 m×2 mm Porapak Q,用体积比为 5% 的氦甲烷作为载气,流速为 40 cm<sup>3</sup>/min。

温室气体排放通量计算公式<sup>[11]</sup>为:

$$F = 60 \times H \times M / 22.4 \times 273 / (273 + T) \times dc/dt$$

式中: $F$  为被测气体排放通量(CO<sub>2</sub>(mg/(m<sup>2</sup>·h))),N<sub>2</sub>O(μg/(m<sup>2</sup>·h)));60 代表分钟和小时的转换系数; $H$  为采样箱的有效高度(m); $M$  为被测气体中 C 或 N 的原子量,分别为 12,28 g/mol; $T$  为采样箱内温度(℃); $dc/dt$  为箱体内被测气体的浓度变化率。

温室气体累积排放量计算公式为:

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i \times d_i}{d}$$

$$G = (\bar{F} \times 24 \times d) / 100$$

式中: $G$  为温室气体排放总量(kg/hm<sup>2</sup>); $F_i$  为第  $i$  次采样时气体排放通量(mg/(m<sup>2</sup>·h)); $d_i$  为第  $i$  次采样至下一次采样的间隔天数; $d$  为生育期总天数,100 为单位转换系数。用测得的温室气体排放量估算农田土壤碳氮挥发量。

**1.4.2 干物质测定** 各小区于完熟期后开始取样,在同行内取连续 3 株,3 次重复,所取样品按器官分离,105 ℃下杀青 30 min,于 80 ℃烘干至恒重后测定干物质质量和各器官含氮量。

**1.4.3 玉米产量及其构成因素测定** 收获时各处理选取 12 m<sup>2</sup>样方,调查样方内有效穗数,并取样测定籽粒含水率折算出含水率为 14% 的产量,3 次重复,取平均值。同时各小区均取样 10 穗,调查穗粒数,测定千粒重和含水量,并计算 14% 水下的千粒重。

### 1.5 农田碳、氮足迹及经济效益估算

**1.5.1 农田碳足迹** 本试验农田碳足迹估算边界从春玉米种植开始到玉米收获为止(2019 年 5 月 1 日至 9 月 29 日;2020 年 5 月 2 日至 10 月 1 日),主要评价农业生产活动在春玉米生育周期内的碳排放总量,其包括土壤呼吸的直接碳排放和生产资料的间接碳排放<sup>[12]</sup>。

碳足迹计算公式为: $C_I = C_r + C_f$

$$C_f = \sum_{i=1}^n C_{fi} = \sum_{i=1}^n m_i \beta_i$$

式中: $C_I$  为碳排放总量(kg·hm<sup>2</sup>); $C_r$  为农田碳排放(kg·hm<sup>2</sup>),由农田 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放数据估算; $C_f$



为春玉米生育周期内各生产资料碳足迹( $\text{kg} \cdot \text{hm}^2$ );  $n$  为春玉米整个生育过程中消耗的  $n$  种物质;  $C_{fi}$  为第  $i$  种物质的碳足迹;  $m_i$  为第  $i$  种物质消耗量;  $\beta_i$  为第  $i$  种物质碳排放系数。碳排放参数取值为柴油  $0.89 \text{ kg/kg}$ , 电能  $0.82 \text{ kg/kWh}$ , 氮肥(纯氮)  $1.53 \text{ kg/kg}$ , 磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ )  $1.63 \text{ kg/kg}$ , 钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ )  $0.65 \text{ kg/kg}$ , 杀虫剂  $16.61 \text{ kg/kg}$ , 除草剂  $10.15 \text{ kg/kg}$ , 玉米种子  $1.05 \text{ kg/kg}$ <sup>[5,13]</sup>。

碳固定量为作物完熟期生物量固碳值, 计算公式为:

$$C_0 = M \times C$$

式中:  $C_0$  为碳固定量( $\text{kg/hm}^2$ );  $M$  为作物植株干物质量;  $C$  为作物植株含碳百分数。春玉米含碳率为  $0.405$ <sup>[14]</sup>。

$$N_C = C_0 - C_I$$
$$C_e = C_0 / C_I$$

式中:  $N_C$  为净碳值,  $N_C > 0$  时, 农田生态系统为固碳,  $N_C < 0$  时, 农田生态系统为碳排放;  $C_e$  为碳效率。

1.5.2 农田氮足迹 农田氮足迹主要为农业生产过程输入氮足迹和输出氮足迹, 输入氮足迹主要为生产资料、机械能源和土壤  $\text{N}_2\text{O}$  氮排放; 输出氮足迹主要为农作物收获和植株固氮。计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$NF_{\text{seed}} = A_{\text{seed}} \times A_a \times N_{\text{seed}}$$
$$NF_{\text{fer}} = T_{\text{fer}} \times N_{\text{fer}}$$
$$NF_{\text{en}} = NF_{\text{NO}_x} + NF_{\text{N}_2\text{O}}$$
$$NF_{\text{NO}_x} = EC \times EFH \times c_1$$
$$NF_{\text{N}_2\text{O}} = EC \times EFM \times c_2$$
$$N_1 = NF_{\text{seed}} + NF_{\text{fer}} + NF_{\text{en}} + G_{\text{N}_2\text{O}}$$

式中:  $NF_{\text{seed}}$  为种子氮足迹( $\text{kg/hm}^2$ );  $A_{\text{seed}}$  为单位面积用种量( $\text{kg}$ );  $A_a$  为播种面积( $\text{hm}^2$ );  $N_{\text{seed}}$  为种子含氮量, 玉米种子含氮量  $1.36\%$ ;  $NF_{\text{fer}}$  为肥料氮足迹( $\text{kg/hm}^2$ );  $T_{\text{fer}}$  为施肥量( $\text{kg/hm}^2$ );  $N_{\text{fer}}$  为肥料含氮量;  $NF_{\text{en}}$  为机械能源氮足迹( $\text{kg/hm}^2$ );  $NF_{\text{NO}_x}$  和  $NF_{\text{N}_2\text{O}}$  为柴油燃烧排放  $\text{NO}_x$  和  $\text{N}_2\text{O}$  氮足迹( $\text{kg/hm}^2$ );  $EC$  为柴油消耗量( $\text{kg/hm}^2$ );  $EFH$  和  $EFM$  为

$\text{NO}_x$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放因子, 取值分别为  $31 \text{ kg/t}$  和  $25.59 \text{ kg/t}$ ;  $c_1$  和  $c_2$  为  $\text{NO}_x$  和  $\text{N}_2\text{O}$  含氮量, 取值分别为  $0.304$  和  $0.727$ ;  $N_1$  为农业生产氮足迹总量( $\text{kg/hm}^2$ );  $G_{\text{N}_2\text{O}}$  为农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$ — $\text{N}$  排放量( $\text{kg/hm}^2$ )。

氮固定量为作物完熟期生物量固氮值, 计算公式为:

$$N_0 = \sum_{i=1}^n N_{fi} = \sum_{i=1}^n a_i b_i$$

式中:  $N_0$  为春玉米植株氮固定量( $\text{kg/hm}^2$ );  $n$  为春玉米植株  $n$  种器官(茎、叶、穗、穗轴、根);  $N_{fi}$  为第  $i$  种器官的固氮量;  $a_i$  为第  $i$  种器官干物质量( $\text{kg/hm}^2$ );  $b_i$  为第  $i$  种器官含氮量。

氮素平衡是氮素管理和政策制定的重要指标, 其定义为在一个给定的系统中一段时间内(一般一季作物或周年)氮素输入和输出的关系<sup>[16]</sup>。

$$N_b = N_0 - N_1$$

有效利用水平 = 输出氮足迹 / 输入氮足迹

式中:  $N_b$  为氮素平衡( $\text{kg/hm}^2$ ),  $N_b > 0$  时, 农田生态系统氮素亏缺,  $N_b < 0$  时, 农田生态系统氮素盈余。

1.5.3 农田经济效益估算

经济效益 = 产量收益 - 种植成本

式中: 产量收益为当年玉米价格(即 2019 年价格  $1.6 \text{ 元/kg}$ , 2020 年价格  $2.4 \text{ 元/kg}$ )与玉米籽粒产量的乘积; 种植成本包括种子投入、化肥、除草剂、杀虫剂、电费、人工费、滴管设备和机械作业。

## 2 结果与分析

### 2.1 春玉米产量及产量构成

由表 1 可知, 相同施氮量下, 不同灌溉方式对春玉米籽粒产量影响显著。浅埋滴灌较传统漫灌显著提高了春玉米千粒重( $P < 0.05$ ), 从而显著提高春玉米籽粒产量( $P < 0.05$ )。浅埋滴灌下, 不同施氮量对春玉米产量构成因素无显著影响, 穗粒数、千粒重和籽粒产量随施氮量的增加呈增加趋势。

表 1 不同处理春玉米产量及其构成因素

| 年份   | 处理             | 有效穗数/ $10^4 \text{ hm}^2$ | 穗粒数                        | 千粒重/g                      | 籽粒产量/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$ |
|------|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|
| 2019 | CK             | $6.75 \pm 0.07\text{a}$   | $497.36 \pm 6.57\text{a}$  | $359.06 \pm 2.24\text{b}$  | $11.66 \pm 0.20\text{b}$                |
|      | T <sub>1</sub> | $6.72 \pm 0.21\text{a}$   | $513.91 \pm 32.29\text{a}$ | $384.16 \pm 2.43\text{a}$  | $14.05 \pm 0.54\text{a}$                |
|      | T <sub>2</sub> | $7.33 \pm 0.12\text{a}$   | $475.64 \pm 5.34\text{a}$  | $376.44 \pm 5.08\text{a}$  | $13.42 \pm 0.46\text{a}$                |
| 2020 | CK             | $6.14 \pm 0.08\text{b}$   | $578.6 \pm 19.78\text{a}$  | $339.12 \pm 8.66\text{b}$  | $11.93 \pm 0.34\text{b}$                |
|      | T <sub>1</sub> | $6.22 \pm 0.28\text{b}$   | $600.09 \pm 42.44\text{a}$ | $366.37 \pm 7.69\text{a}$  | $13.95 \pm 0.44\text{a}$                |
|      | T <sub>2</sub> | $6.69 \pm 0.10\text{a}$   | $545.05 \pm 28.60\text{a}$ | $355.58 \pm 8.18\text{ab}$ | $13.33 \pm 0.61\text{a}$                |

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示各处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

### 2.2 春玉米田碳足迹

春玉米农田生育期内碳足迹包括生产资料碳排放和土壤呼吸碳排放。由图 3 可知, 各处理土壤  $\text{CO}_2$  碳排放是春玉米农田碳足迹的重要组成部分, 占比  $43\% \sim 44\%$ , 其次为化肥碳排放, 占比  $21\% \sim 24\%$ 。

处理间生产资料碳排放差异之处在于浅埋滴灌较传统漫灌大幅降低灌溉量, 因此 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处理电能碳排放降低; 施氮量与碳排放量呈正相关, T<sub>2</sub> 处理施氮量减少, 化肥碳排放随之减少。春玉米田碳足迹总体表现为 T<sub>2</sub> > CK > T<sub>1</sub>, 这表明相比传统漫灌, 浅埋滴灌

下优化追氮可以降低系统碳排放。

由表 2 可知,各处理净碳值均为正值,说明不同处理农田生态系统均表现为固碳状态。相同施氮量下,浅埋滴灌 T<sub>1</sub>处理碳固定量显著高于传统漫灌 CK ( $P<0.05$ ),净碳值提高 15.43%;浅埋滴灌下优化追氮 T<sub>2</sub>处理相比于传统漫灌 CK 处理,在降低生产资料碳排放和土壤 CO<sub>2</sub>-C 排放量的同时提高碳固定量,净碳值增加 9.29%。

由表 2 可知,各处理 CH<sub>4</sub>-C 排放量均为负值,说明不同处理农田生态系统均表现为 CH<sub>4</sub> 弱的碳汇,且传统漫灌较浅埋滴灌增加对 CH<sub>4</sub> 的吸收量;相同施氮量下,浅埋滴灌和传统漫灌 CO<sub>2</sub>-C 排放量无显著差异;浅埋滴灌下 CO<sub>2</sub>-C 排放量随施氮量的降低呈下降趋势<sup>[17]</sup>。浅埋滴灌下优化追氮 T<sub>2</sub>处理较 CK 处理增加碳固定量,降低生产资料碳排放和土壤呼吸碳排放,碳效率提高 10.63%。

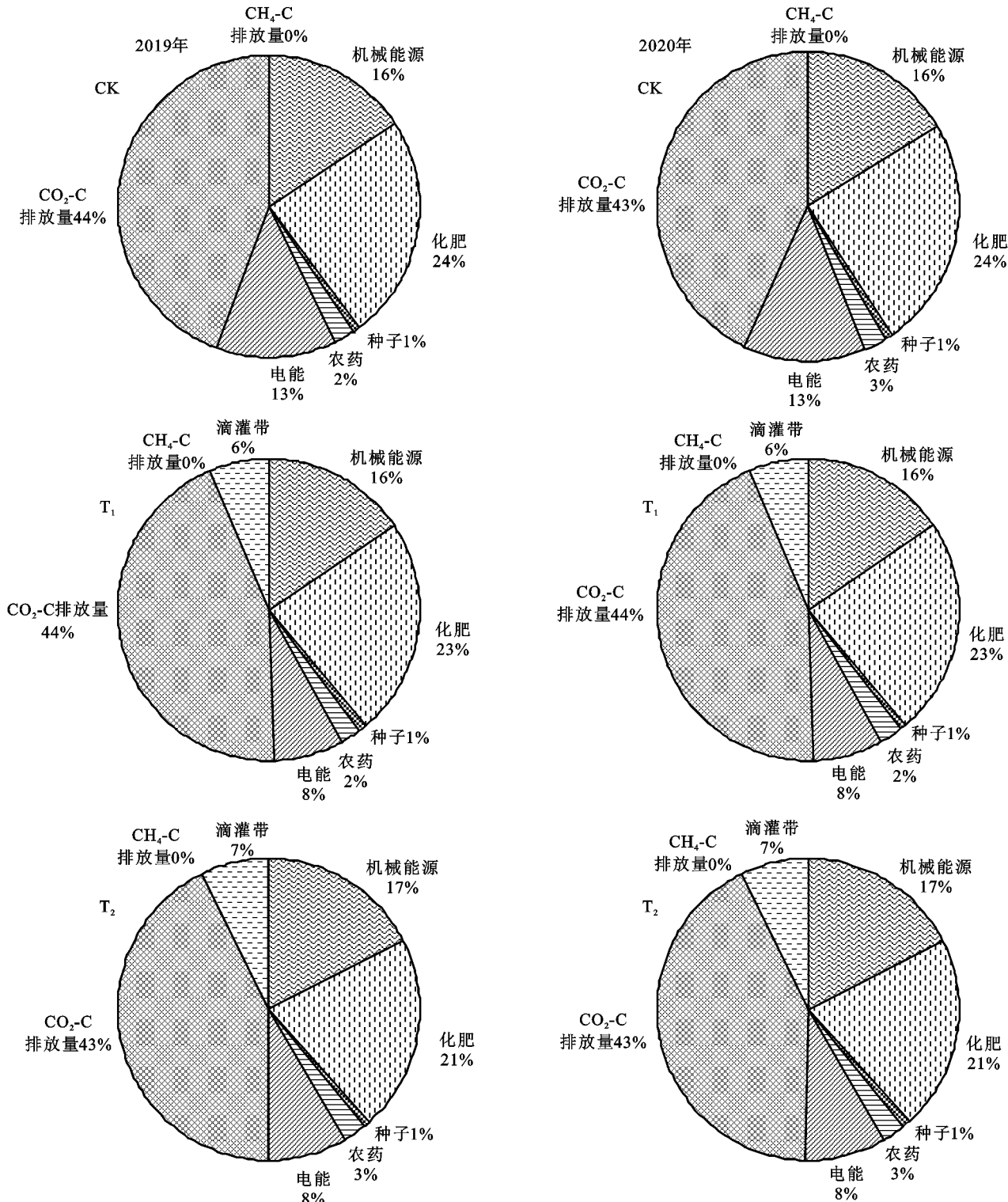


图 3 各处理生产资料占农田碳足迹百分比

表 2 不同处理碳固定、碳排放和净碳值

| 年份   | 处理             | 碳固定量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 生产资料碳排放/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 土壤呼吸碳排放量/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 净碳值/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 碳效率        |
|------|----------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------|
| 2019 | CK             | 8678.58±130.18c                 | 1604.15                            | 1280.57±52.96a                      | 5793.00±159.82b                | 3.01±0.09a |
|      | T <sub>1</sub> | 9632.39±177.16a                 | 1648.1                             | 1296.69±47.54a                      | 6687.03±222.21a                | 3.27±0.11a |
|      | T <sub>2</sub> | 9050.43±96.73b                  | 1510.36                            | 1128.07±31.89b                      | 6331.27±186.58a                | 3.33±0.15a |
| 2020 | CK             | 8904.50±226.44b                 | 1604.15                            | 1220.13±71.31a                      | 6080.22±238.21b                | 3.15±0.11a |
|      | T <sub>1</sub> | 9872.79±236.90a                 | 1648.1                             | 1306.87±74.89a                      | 6917.81±295.56a                | 3.34±0.16a |
|      | T <sub>2</sub> | 9105.01±102.18b                 | 1510.36                            | 1117.59±63.23a                      | 6477.06±157.15ab               | 3.47±0.12a |

2.3 春玉米田氮足迹

春玉米农田氮足迹主要包括输入氮足迹和输出氮足迹,输入氮足迹主要为种子投入、化肥施用、耕整地机械能源和土壤 N<sub>2</sub>O—N 排放;输出氮足迹主要为玉米收获籽粒和秸秆固氮。由表 3 可知,输入氮足迹中机械作业和种子投入以及土壤 N<sub>2</sub>O—N 排放贡献较少,主要为化肥输入氮,占比 93.86%~95.38%。各处理氮素平衡均为负值(表 3),表明该生态系统表现为氮素盈余。其中浅埋滴灌下 T<sub>2</sub>处理氮素平衡差值最接近零,且显著低于 T<sub>1</sub>和 CK 处理( $P<0.05$ )。

表 3 不同处理输入氮足迹和输出氮足迹

| 年份   | 处理             | 输入氮足迹/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |     |       |                        | 输出氮足迹/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>(作物固氮量) | 氮素平衡/<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 有效利用水平      |
|------|----------------|------------------------------|-----|-------|------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|-------------|
|      |                | 种子氮                          | 肥料氮 | 机械能源氮 | N <sub>2</sub> O—N 排放量 |                                             |                                 |             |
| 2019 | CK             | 0.272                        | 335 | 0.95  | 1.65±0.09b             | 254.14±11.50ab                              | -83.74±11.47b                   | 0.75±0.03b  |
|      | T <sub>1</sub> | 0.272                        | 335 | 0.95  | 1.85±0.07a             | 277.27±12.70a                               | -60.80±12.64b                   | 0.82±0.04ab |
|      | T <sub>2</sub> | 0.272                        | 245 | 0.95  | 1.47±0.07b             | 228.03±14.27b                               | -19.67±14.26a                   | 0.92±0.06a  |
| 2020 | CK             | 0.272                        | 335 | 0.95  | 2.06±0.15ab            | 247.10±15.15b                               | -91.19±15.02b                   | 0.73±0.04b  |
|      | T <sub>1</sub> | 0.272                        | 335 | 0.95  | 2.34±0.14a             | 288.94±9.19a                                | -49.68±9.19b                    | 0.85±0.03a  |
|      | T <sub>2</sub> | 0.272                        | 245 | 0.95  | 1.90±0.11b             | 229.24±3.80b                                | -19.47±3.87a                    | 0.92±0.02a  |

2.4 农田经济效益分析

由表 4 可知,各处理产量收益表现为 T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>>CK,其中浅埋滴灌下 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>处理无显著差异,分别较传统漫灌 CK 提高 20.50%和 15.08%。农田经济效益各处理趋势与产量收益相同,表现为 T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>>CK,相同施氮量下,浅埋滴灌 T<sub>1</sub>处理较传统漫灌 CK 处理经济效益增加 32.92%;浅埋滴灌下优化追氮 T<sub>2</sub>处理与 T<sub>1</sub>处理经济效益无显著差异,较传统漫灌 CK 提高 31.08%。

表 4 不同处理农田经济效益

| 年份   | 处理             | 产量收益/<br>(元·hm <sup>-2</sup> ) | 种植成本/<br>(元·hm <sup>-2</sup> ) | 经济效益/<br>(元·hm <sup>-2</sup> ) |
|------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 2019 | CK             | 18659.28±325.36b               | 7680                           | 10979.28±325.36b               |
|      | T <sub>1</sub> | 22483.68±858.12a               | 7890                           | 14593.68±858.12a               |
|      | T <sub>2</sub> | 21473.52±728.04a               | 7080                           | 14393.52±728.04a               |
| 2020 | CK             | 28641.10±826.12b               | 7680                           | 20961.10±826.12b               |
|      | T <sub>1</sub> | 33469.66±1052.28a              | 7890                           | 25579.66±1052.28a              |
|      | T <sub>2</sub> | 31981.00±1458.76a              | 7080                           | 24901.00±1458.76a              |

3 讨论

3.1 灌溉对农田生态系统碳、氮足迹的影响

内蒙古是我国重要的玉米主产区,又是水资源严重短缺的省区,水粮矛盾和区域水资源供需矛盾日益

这表明相比于传统漫灌,浅埋滴灌下优化氮肥用量有利于土壤氮素平衡,减轻因施氮过多造成环境氮污染风险。有效利用水平为作物固氮输出氮足迹与输入氮足迹的比值,浅埋滴灌下优化追氮 T<sub>2</sub>处理有效利用水平最高,T<sub>1</sub>处理次之,CK 处理最低。与传统漫灌 CK 处理相比,浅埋滴灌下 T<sub>1</sub>处理作物固氮量增加 9.10%,输出氮足迹相差较小,氮投入有效利用水平提高 9.33%;浅埋滴灌下优化追氮 T<sub>2</sub>处理较 CK 处理作物固氮量降低 10.27%,输入氮足迹的下降 26.69%,氮投入有效利用水平提高 22.67%。

凸显。膜下滴灌曾是内蒙古灌区玉米的主要生产方式,随着种植年限的增加,残膜污染问题加剧。浅埋滴灌技术最早报道应用于新疆牧草等的生产种植<sup>[18]</sup>,后来逐渐发展推广到玉米等粮食作物<sup>[19]</sup>。近年来,内蒙古民族大学玉米团队在西辽河平原灌区针对浅埋滴灌技术模式的推广应用开展了大量研究工作,明确了浅埋滴灌下春玉米产量提高的生理生态机制。本文对浅埋滴灌条件下春玉米农田生态系统碳排放和固定进行了研究,目前,从净碳值的角度考虑更能反映春玉米农田生态系统对温室效应的贡献潜力<sup>[20]</sup>,前人<sup>[3]</sup>的研究主要集中在农田温室气体直接碳排放,忽略了农业生产资料投入的间接碳排放以及农作物固碳。浅埋滴灌方式与传统漫灌方式相比,花后维持较高的物质生产能力,从而使吐丝后干物质积累量较高,且保持较高的干物质转运效率,提高弱势粒的灌浆速率,促进籽粒灌浆,籽粒产量较传统漫灌高 1.4%~6.2%;灌溉水利用效率浅埋滴灌较传统漫灌高 44.8%~51.7%<sup>[21]</sup>。不同灌溉措施显著影响作物碳氮循环,有研究<sup>[22]</sup>表明,灌溉措施主要通过促进三羧酸循环和氧化磷酸化过程,增强氧化型辅酶活



性,提高光合速率,促进作物对养分元素的吸收和利用;滴灌减少耕层土壤水分无效蒸发,提高生育前期叶片气孔导度、叶绿素含量及花后叶片光合速率,保证光合产物累积;但灌溉量过低会导致植物体内缺水,进而降低功能叶片蔗糖合成酶等活性<sup>[23]</sup>。相同灌溉量下,灌溉频次过低导致生育前期光化学效率下降;灌溉频次过高导致单次灌溉量较低,土壤深层水分亏缺,影响作物生长<sup>[24]</sup>。本研究综合分析了农业生产资料碳排放和农作物固碳量,结果表明,浅埋滴灌下  $T_1$  和  $T_2$  处理净碳值大于传统漫灌 CK 处理,浅埋滴灌较传统漫灌提高水肥利用效率,春玉米干物质转运率和干物质转运量增加<sup>[21]</sup>,生物量的增加直接增加固碳量,提高净碳值。同时,本文借鉴碳足迹的概念,依据农业生产过程输入氮足迹和输出氮足迹对春玉米农田生态系统氮足迹进行估算,结果表明,在相同施氮量下,浅埋滴灌较传统漫灌增加了输入氮足迹,主要为浅埋滴灌增加  $N_2O$  排放,这可能是由于灌溉量大幅降低减少氮素淋失<sup>[25]</sup>。

### 3.2 优化施氮对农田生态系统碳、氮足迹的影响

碳氮代谢是作物生长发育的 2 个重要生理过程。合理氮素投入对调控碳氮代谢以及促进碳氮物质的形成、转运与分配具有重要作用。施氮量过低,作物光合性能下降;氮素供应过量,叶片 C/N 值过低,光合产物对光合器官的反馈产生抑制,光合产物的输出减少<sup>[26]</sup>。氮素施用时期和方式也会影响作物对氮素的吸收利用,氮肥后移可延长生育后期有效光合时间,促进后期碳代谢以及代谢产物的积累。研究<sup>[27]</sup>表明,玉米拔节期一次性施氮会造成生育后期缺氮,导致叶肉细胞叶绿体结构变差,同时伤害光系统间的电子传递链造成产量下降。氮肥分次追施可以维持生育期内较高光合作用,随施氮次数的增加可提高叶面积和降低生育后期叶片衰老,氮素分 3~4 次追施较一次性施氮可提高籽粒产量 9.3%~18.2%<sup>[28]</sup>。与传统漫灌相比,浅埋滴灌下常量追氮  $T_1$  处理增加了碳排放,优化追氮  $T_2$  处理减少了碳排放,这可能与各处理农资投入比例不一和水氮管理模式改变对土壤温室气体排放的影响不同有关。本研究中,土壤  $CO_2$  碳排放是该系统碳足迹主要来源,占比 43%~44%;其次化肥和机械能源碳排放是该系统碳足迹主要来源,占比 38%~40%,这与其他研究<sup>[6]</sup> 结果类似。春玉米农田  $CO_2$  排放随施氮量的增加而增加, $CO_2$  排放的增加并不总是产生更高的碳排放,因为土壤呼吸碳排放可能会被更高的生物量固碳所抵消,减少碳排放。因此,减少农田氮肥施用量,提高水氮利用效率是降低春玉米农田生态系统碳排放的重要措施。本研究结果表明,在相同施氮量下,浅埋滴灌较传统漫灌增加输入氮足迹,主要为浅埋滴灌增加  $N_2O$  排放,这可能是由于灌溉量大幅降低减少氮素淋失<sup>[25]</sup>,同时由于追肥次数的增多土壤表层氮素含量升高<sup>[29]</sup>,为土壤硝化和反硝化作用提供反应底

物,有利于  $N_2O$  生成与排放。土壤氮素是  $N_2O$  排放的主要供应源,减少氮素的施用可以降低  $N_2O$  排放。输入氮足迹中化肥施用造成的氮足迹占比 93.86%~95.38%,说明化肥施用是春玉米农田生态系统氮足迹增加的主要来源。氮素平衡常用以指示氮肥管理水平 and 环境影响程度,建立农田生态系统的氮素平衡可以更好的评价氮素排放和环境影响<sup>[16]</sup>。本研究结果表明,各处理氮素平衡均为负值,表现为氮素盈余,浅埋滴灌下优化追氮  $T_2$  处理的氮素平衡最接近零点,这表明优化氮肥施用可以平衡氮素循环,减少氮素排放对环境的污染,有利于农业可持续发展。

## 4 结论

浅埋滴灌下  $T_1$  和  $T_2$  处理相比传统漫灌 CK 处理,在提高玉米产量的同时,增加农田经济效益( $P < 0.05$ );相同施氮量下,浅埋滴灌较传统漫灌提高净碳值,碳效率、氮投入有效利用水平和氮素平衡无显著差异;浅埋滴灌下优化追氮  $T_2$  处理与常量追氮  $T_1$  处理相比,氮投入有效利用水平提高 12.20%,氮素平衡降低 67.65%,净碳值无显著差异。因此,浅埋滴灌下追氮较常规追氮量减 30%,降低农田生态系统碳、氮排放,提高碳效率和氮投入有效利用水平,又保证较高玉米产量和农田经济效益,是西辽河平原玉米兼顾高产、高效和生态的水氮管理模式。

### 参考文献:

- [1] Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's annual global mean energy budget[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(2): 197-208.
- [2] 刘晶晶, 张阿凤, 冯浩, 等. 不同灌溉量对小麦—玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 169-179.
- [3] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米  $N_2O$  和  $CO_2$  排放的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4381-4389.
- [4] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 240-247.
- [5] 李玲, 李亚杰, 张永杰, 等. 不同水氮管理措施下复播大豆农田碳平衡[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3673-3679.
- [6] 李春喜, 刘晴, 邵云, 等. 有机物料还田和减施氮肥对麦—玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 527-536.
- [7] Chen Z D, Xu C C, Ji L, et al. Effects of multi-cropping system on temporal and spatial distribution of carbon and nitrogen footprint of major crops in China[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22(3): 1-18.
- [8] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 长江中游地区稻麦生产系统碳足迹及氮足迹综合评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1125-1133.

- the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J]. *Geoderma*, 1995, 64(3/4): 197-214.
- [27] Frizano J, Johnson A H, Vann D R, et al. Soil phosphorus fractionation during forest development on landslide Scars in the Luquillo Mountains, Puerto Rico[J]. *Biotropica*, 2002, 34(1): 17-26.
- [28] 辜翔, 张仕吉, 刘兆丹, 等. 中亚热带植被恢复对土壤有机碳含量、碳密度的影响[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(5): 83-96.
- [29] 王娜, 朱小叶, 方晰, 等. 中亚热带退化林地土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳的变化[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 218-225, 234.
- [30] 宋创业, 郭柯. 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(1): 40-49.
- [31] 薛鸥, 魏天兴, 刘飞, 等. 公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(1): 91-100.
- [32] 江源, 章异平, 杨艳刚, 等. 放牧对五台山高山、亚高山草甸植被—土壤系统耦合的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 837-846.
- [33] Lang F, Bauhus J, Frossard E, et al. Phosphorus in forest ecosystems: New insights from an ecosystem nutrition perspective[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(2): 129-135.
- [34] Tilman D. Nitrogen-limited growth in plants from different successional stages[J]. *Ecology*, 1986, 67(2): 555-563.
- [35] Bedford B L, Walbridge M K, Lldous A. Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate North American wetlands[J]. *Ecology*, 1999, 80(7): 2151-2169.
- [36] Belsky A. Population and community processes in a mosaic grassland in the Serengeti, Tanzania[J]. *Journal of Ecology*, 1986, 74(3): 841-856.
- [37] 李振基, 陈小麟, 郑海雷. 生态学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2004.
- (上接第 284 页)
- [9] Scheer C, Wassmann R, Kienzler K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 290-301.
- [10] 郭晓旭, 杨恒山, 郇继承, 等. 作物浅埋滴灌技术研究进展[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(1): 80-84.
- [11] Lyamuremye F, Dick R P, Baham J. Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption[J]. *Soil Science*, 1996, 161(7): 426-435.
- [12] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 981-990.
- [13] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 2004—2015 年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(7): 1105-1114.
- [14] 卢小宏, 黄晶, 史磊刚, 等. 北京市主要农作模式的碳效益分析[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 48-53.
- [15] 周涛, 王云鹏, 王芳, 等. 广东省农业氮足迹分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(9): 2430-2438.
- [16] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 281-296.
- [17] 李锐, 杨恒山, 郇继承, 等. 浅埋滴灌条件下优化施氮对春玉米田温室气体排放的影响[J]. *玉米科学*, 2020, 28(6): 154-161.
- [18] 曹彪, 白云岗, 卢震林, 等. 寒旱区紫花苜蓿浅埋式滴灌灌溉制度试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(增刊 2): 60-62.
- [19] 梅园雪, 冯玉涛, 冯天骄, 等. 玉米浅埋滴灌节水种植模式产量与效益分析[J]. *玉米科学*, 2018, 26(1): 98-102.
- [20] 黄坚雄, 陈源泉, 刘武仁, 等. 不同保护性耕作模式对农田的温室气体净排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 2935-2942.
- [21] 杨恒山, 薛新伟, 张瑞富, 等. 灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 69-77.
- [22] 王福祥, 肖开转, 姜身飞, 等. 干旱胁迫下植物体内活性氧的作用机制[J]. *科学通报*, 2019, 64(17): 1765-1779.
- [23] 刘战东, 张凯, 黄超, 等. 不同耕作和灌溉方式对玉米光合特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 213-220.
- [24] 刘涛, 吴漩, 郑子成, 等. 不同灌水频率条件下设施土壤水盐运移特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(4): 622-631.
- [25] 郭树芳, 齐玉春, 罗小玲, 等. 滴灌对干旱区春小麦田土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 排放及综合增温潜力的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(4): 792-798.
- [26] 孙雪芳, 丁在松, 侯海鹏, 等. 不同春玉米品种花后光合物质生产特点及碳氮含量变化[J]. *作物学报*, 2013, 39(7): 1284-1292.
- [27] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3151-3158.
- [28] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 576-585.
- [29] 关红杰, 李久生, 栗岩峰. 干旱区滴灌均匀系数和灌水量对土壤水氮分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 121-128.