

# 不同产业沼气作物农田净生态系统生产力和水分利用效率比较

段青松<sup>1,2</sup>, 何丙辉<sup>1\*</sup>, 秦向东<sup>3</sup>, 字淑慧<sup>4</sup>, 张涛<sup>3</sup>, 杨秀萍<sup>4</sup>, 刘云华<sup>3</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 云南农业大学机电工程学院, 云南省高校生物天然气产业化技术工程研究中心, 昆明 650201; 3. 云南农业大学, 基础与信息工程学院, 云南省高校生物天然气产业化技术工程研究中心, 昆明 650201; 4. 云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201)

**摘要:** 产业沼气作物是发酵制气的重要原料, 开展产业沼气作物农田净生态系统生产力(net ecosystem production, NEP)和水分利用效率(water use efficiency, WUE)的研究, 为产业沼气作物的筛选和种植提供依据。采用静态钠石灰吸收法和静态箱-红外 CO<sub>2</sub> 分析法、非称重式蒸渗仪法测定了常规种植条件下 4 种作物农田 NEP 和群体水分利用效率(population water use efficiency, WUE<sub>p</sub>)、生态水分利用效率(ecosystem water use efficiency, WUE<sub>e</sub>), 并设裸地进行对照。结果表明: 1) 观测的 5 个处理, NEP 的大小顺序是杂交狼尾草(17 533.1 kg/hm<sup>2</sup>)> 曲晨 9 号玉米(9 172.9 kg/hm<sup>2</sup>)> 云瑞 88 玉米(8 462.7 kg/hm<sup>2</sup>)> 紫花苜蓿(273.6 kg/hm<sup>2</sup>)> 裸地(-2 377.0 kg/hm<sup>2</sup>), 4 种作物农田是 CO<sub>2</sub> 的汇, 裸地是源。2) WUE<sub>p</sub> 大小排序为杂交狼尾草(10.89 kg/m<sup>3</sup>)> 曲晨 9 号(7.23 kg/m<sup>3</sup>)> 云瑞 88 玉米(6.79 kg/m<sup>3</sup>)> 紫花苜蓿(3.46 kg/m<sup>3</sup>)。WUE<sub>e</sub> 大小顺序为杂交狼尾草(4.19 kg/m<sup>3</sup>)> 曲晨 9 号(2.38 kg/m<sup>3</sup>)> 云瑞 88(2.20 kg/m<sup>3</sup>)> 紫花苜蓿(0.06 kg/m<sup>3</sup>), 与 NEP 的排序相同。以生物量、NEP、WUE<sub>p</sub>、WUE<sub>e</sub> 来衡量, 杂交狼尾草优于其他 3 种作物, 可优先推广种植。

**关键词:** 作物; 沼气; 生态系统; 产业沼气作物; 净生态系统生产力; 群体水分利用效率; 生态水分利用效率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.037

中图分类号: 156.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-01-0265-07

段青松, 何丙辉, 秦向东, 字淑慧, 张涛, 杨秀萍, 刘云华. 不同产业沼气作物农田净生态系统生产力和水分利用效率比较[J]. 农业工程学报, 2016, 32(01): 265-271. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.037 <http://www.tcsae.org>  
Duan Qingsong, He Binghui, Qin Xiangdong, Zi Shuhui, Zhang Tao, Yang Xiuping, Liu Yunhua. Comparison of net ecosystem productivity of farmland and water use efficiency among different industrial biogas crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(01): 265-271. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.037 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

为减少温室气体排放, 产业沼气作为一种优质高效的生物质能源近年来得到快速发展<sup>[1]</sup>。沼气作物是产业沼气的重要原料, 来源主要有玉米、高粱、甘蔗等大田作物以及紫花苜蓿、杂交狼尾草、象草等草本植物<sup>[2]</sup>。对沼气作物的筛选, 不仅考虑其干物质产量、产能潜力等经济指标, 还需考虑种植过程中农田生态系统的碳平衡、水分利用效率和氮污染等环境指标<sup>[3]</sup>。因此, 研究产业沼气作物的农田净生态系统生产力(net ecosystem production, NEP)和水分利用效率(water use efficiency, WUE), 筛选经济和生态环境效益高的沼气作物, 对推动产业沼气发展, 减少温室气体排放, 提高水资源的利用效率具有重要的意义。

陆地生态系统碳的净吸收或净排放称为净生态系统生产力, 农田 NEP 直接定性定量地描述了农田生态系统

碳源/汇的性质和能力, 在全球气候变缓的背景下, 学者就不同地区、不同作物的农田 NEP 开展了研究。如德国学者 Anthoni 等在图林根研究了冬小麦的碳平衡<sup>[4]</sup>; Verma 等在美国内布拉斯加对玉米农田生态系统年度碳平衡作了研究<sup>[5]</sup>; Béziat 在法国西南部对油菜、冬小麦、向日葵等轮作的农田净生态系统生产力进行了研究<sup>[6]</sup>; 周立峰等研究了不同灌水下复合肥对冬小麦产量及农田净生态系统生产力的影响<sup>[7]</sup>; 张宇等研究了耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响<sup>[8]</sup>。但这些研究主要针对小麦、玉米等大田农作物, 而对新兴的产业沼气作物研究相对较少。

WUE 是指作物消耗单位水分所产生的干物质量或所固定的碳量, 它不仅反映了作物物质生产与水分消耗之间的关系, 还反映了生态系统碳-水循环的相互关系, 长期以来是学者研究的热点。起初的研究主要关注大田作物单位水分所生产的干物质的量, 即群体水分利用效率(population water use efficiency, WUE<sub>p</sub>), 随着生物质能源的发展, 对能源作物的 WUE 研究也从 WUE<sub>p</sub> 逐步扩展到生态系统水分利用效率 WUE<sub>e</sub>(ecosystem water use efficiency, WUE<sub>e</sub>), 即 NEP 与系统蒸散量 ET 之比。如 Marcelo 等在伊利诺伊州中部研究了玉米(*Zea mays*)、芒草(*Miscanthus × giganteus*)、柳枝稷(*Panicum virgatum*)等作物的 WUE<sup>[3]</sup>, Erickson 等在美国佛罗里达州研究了象草(*Pennisetum purpureum* Schum.)、芦竹(*Arundo donax* L.)、

收稿日期: 2015-07-08 修订日期: 2015-11-26

基金项目: 云南省高校生物天然气产业化技术工程研究中心建设项目(2014)

作者简介: 段青松(1971-), 男, 白族, 云南大理人, 副教授, 在读博士。主要从事农业水土工程研究。重庆 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 400715。Email: 258437886@qq.com

※通信作者: 何丙辉(1966-)男, 湖南汨罗人, 教授, 博士导师, 主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。重庆 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 400715。Email: hebingshui@aliyun.com

能源甘蔗(*Saccharum* spp.)等多年生能源作物的 WUE<sup>[9]</sup>, Vanloocke 等利用生态系统模型模拟分析了美国中西部不同能源作物的 WUE<sup>[10]</sup>。国内对产业沼气的 WUE 研究相对滞后,影响了我国产业沼气的发展。

滇中地区是云南省社会经济发展水平最高的地区,能源需求量大,同时该地区有着大量的荒山荒地和低效土地,适宜发展产业沼气作物,但该地区水资源短缺,农业用水紧张。因此本研究选择在滇中地区种植较广的饲料玉米曲晨 9 号、普通玉米云瑞 88 号、禾本科的杂交狼尾草和豆科的紫花苜蓿,开展产业沼气作物农田净生态系统生产力和水分利用效率的研究,为滇中地区产业沼气作物的筛选和种植提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于云南农业大学教学试验农场, N25°18', E102°45', 海拔 1 978 m, 亚热带高原季风气候, 年平均气温 15.3 ℃, 多年平均年降雨量 979.3 mm, 土壤为旱地红壤, 质地为轻黏壤, 有机质含量 12.08 g/kg, 全氮 1.30 g/kg, 全磷 1.12 g/kg, 全钾 14.45 g/kg, pH 为 6.4。

### 1.2 观测时间

为便于对照, 观测时间为 2013 年的玉米生长期, 从 5 月 20 日到 9 月 29 日。

### 1.3 供试沼气作物

玉米(*Zea mays* L.)。玉米秸秆的总固形物(total solid, TS)产气量在 400 mL/g 左右<sup>[11]</sup>。玉米有以收获籽粒为主的常规品种, 还有以收获秸秆、生物量高、易发酵的沼气专用玉米。选择云瑞 88 号代表常规品种, 国内尚未培育出沼气专用玉米, 选择性能相似的饲料玉米曲晨 9 号代表。

杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*)是美洲狼尾草和象草的杂交种, 多年生禾本科植物。该草植株根系发达, 植株高大可达 4.0~5.0 m, 生长快, 既有很好的水土保持效果, 也能有效抑制紫茎泽兰等害草的生长, 具有良好的生态环保作用, 产气量为 570 mL/g<sup>[12]</sup>。杂交狼尾草一年可多次刈割, 种植第一年产量较低, 第二年以后产量较高且稳定, 本文以第二年的作为研究对象。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)。多年生豆科草本植物, 适应性广, 根系发达, 可吸收土壤深层的水分, 在年降雨量 250~800 mm 的地区均可种植。紫花苜蓿每年可刈割 3~6 次, 厌氧发酵产气在 598 mL/g<sup>[13]</sup>。紫花苜蓿第一年产量较低, 第二年以后产量较高且稳定, 本文以第二年的作为研究对象, 种植品种为 WL525HQ。

### 1.4 田间试验设计、作物种植管理及生物量测定

#### 1.4.1 田间试验设计

本试验采用田间随机设计。设处理 A 曲晨 9 号玉米、处理 B 云瑞 88 号玉米、处理 C 杂交狼尾草、处理 D 紫花苜蓿、处理 E 裸地(对照, CK) 5 个处理, 3 次重复, 共 15 个小区, 每个小区面积为 5 m × 6 m = 30 m<sup>2</sup>。小区间及周边用深度为 100 cm 的混凝土埂分隔, 田埂高于地面 20 cm。

#### 1.4.2 作物种植及管理

作物按常规方法进行种植和管理。

杂交狼尾草于 2012 年 3 月 20 日利用茎节扦插繁殖, 种植密度 40 000 株/hm<sup>2</sup>。底肥为有机肥 30 000 kg/hm<sup>2</sup>, 复合肥 450 kg/hm<sup>2</sup>。分蘖肥尿素 60 kg/hm<sup>2</sup>。株高 2.5 m 刈割, 割后施尿素 300 kg/hm<sup>2</sup>。

紫花苜蓿于 2012 年 3 月 20 日播种, 条播, 行距 25 cm, 播种量为 20 kg/hm<sup>2</sup>。底肥为有机肥 30 000 kg/hm<sup>2</sup>, 速效磷 100 kg/hm<sup>2</sup>。初花期或株高 0.6 m 刈割, 刈割后追肥速效磷、钾各 0.3 kg/hm<sup>2</sup>。

玉米 2013 年 5 月 4 日育苗, 5 月 20 日移栽, 云瑞 88 号种植密度 66 667 株/hm<sup>2</sup>, 曲晨 9 号种植密度 80 000 株/hm<sup>2</sup>, 底肥为有机肥 30 000 kg/hm<sup>2</sup>、复合肥 450 kg/hm<sup>2</sup>。拔节肥为尿素 600 kg/hm<sup>2</sup>, 中耕除草 2 次。9 月 29 日收获。

#### 1.4.3 生物量测定

2013 年 9 月 29 日收割玉米。2013 年 5 月 20 日、7 月 12 日、9 月 29 日分别收割杂交狼尾草和紫花苜蓿的地上部分, 后 2 次产量之和即为地上部分的生物量, 采用烘干法测定。

地下部分生物量测定。杂交狼尾草和紫花苜蓿采用根钻法取样, 范围为地下 0~90 cm, 2013 年 5 月 20 日、9 月 29 日各取一次, 烘干测定, 2 次之差即为观测期增加的生物量。玉米收获时将根系挖出, 烘干测定。

### 1.5 农田 CO<sub>2</sub> 排放量测定及 NEP 的测算

#### 1.5.1 农田 CO<sub>2</sub> 排放量

农田 CO<sub>2</sub> 排放量即为土壤呼吸排放到大气中 CO<sub>2</sub>。采用静态钠石灰吸收法测定<sup>[13]</sup>, 并用静态箱-红外 CO<sub>2</sub> 分析仪法对测定结果进行修正<sup>[14]</sup>。

静态钠石灰吸收法, 每个小区测 3 个点。1) 测定前将钠石灰在 105 ℃烘干 24 h, 测定时将烘干、称质量、记录后的钠石灰 40 g 装入玻璃培养皿并用纯净水充分湿润。2) 清除测定地地上的植物和地表凋落物, 把培养皿置于测定点的小铁架上, 铁架上方倒扣直径为 28 cm, 高 40 cm 塑料桶, 将塑料桶下缘轻轻旋入土壤 2~3 cm, 塑料桶上覆盖遮蔽物, 防止阳光直射。3) 取样时间为上午 9:00~11:00 之间, 扣箱时间为 3 d, 间隔 7 d 后再扣箱。4) 测定结束后取出培养皿, 于 105 ℃烘干 24 h, 称质量记录, 精确度为 0.001 g。5) 对照的裸地一旦有草长出, 立即拔除。

静态箱-红外 CO<sub>2</sub> 分析仪法测定仪器为 Telaire 7001 便携式红外线 CO<sub>2</sub> 分析仪, 试验前用 CO<sub>2</sub> 标准气对仪器进行了校正。每次测量 CO<sub>2</sub> 排放通量的同时测定土壤 5、10、15、20、25 cm 处温度。排放通量由箱中气体浓度随时间的变化率计算得出, 通量计算方程为

$$F = \frac{h \times M_w \times T_{st}}{M_v \times (T_{st} + T)} \cdot \frac{dc}{dt}, \quad (1)$$

式中  $F$  为 CO<sub>2</sub> 排放通量, mg/m<sup>2</sup>·h;  $dc/dt$  为箱内痕量气体随时间的变化率;  $h$  为采样箱高, cm;  $M_w$  为痕量气体的摩尔质量, g/mol;  $T_{st}$  为标准状态下的温度, 273.2 K;  $M_v$  为痕量气体的摩尔体积, L/mol;  $T$  为测定时的土壤温度, ℃。

#### 1.5.2 农田 NEP 的测算

净生态系统生产力(NEP)的计算公式为:

$$NEP = NPP - R_s \quad (2)$$

其中, NPP(net primary productivity)为作物净初级生产力, 即全生育期的总生物固碳量。据测算作物光合作用



合成 1 g 有机质所吸收 C 为 0.45 g<sup>[15]</sup>,因此 NPP 等于作物地上、地下部分生物量之和乘以 0.45,  $R_s$  为土壤呼吸碳排放量,三个量的单位均为 kg/hm<sup>2</sup>。NEP 为正值表示系统是大气 CO<sub>2</sub> 的吸收“汇”,负值为大气 CO<sub>2</sub> 的排放“源”。

## 1.6 降雨量、土壤含水量测定和水分利用效率测算

### 1.6.1 降雨量观测

在试验地设有一台自动观测气象站(美国造 Davis Vantage Pro 2 型无线自动气象站)观测气温、日降雨量、降雨次数等指标。

### 1.6.2 土壤含水量测定

玉米移栽前 2 个月,在每个小区内布设 3 根 PR2 土壤剖面水分仪套管。在玉米移栽和收获时用 PR2 水分仪测定 0、10、20、30、40、60、100 cm 深土壤的体积含水量,取 3 个点的平均值作为小区 0~100 cm 深土壤的含水量。采用开挖法测定每个小区深 150、200 cm 处土壤密度,用烘干法测定质量含水量,计算体积含水量。

### 1.6.3 水分利用效率计算

采用非称重式蒸渗仪研究。观测期贮水深度的变化量用下式计算:

$$\Delta D_w = (\theta_2 - \theta_1) \cdot h_s \quad (3)$$

式中  $\Delta D_w$  表示观测期贮水深度的变化量,mm; $\theta_2, \theta_1$  分别表示收获和移栽时农田土壤的剖面体积含水量,%; $h_s$  为计算土层厚度,取为 2 000 mm。

腾发量根据水量平衡方程计算:

$$ET = P + I + U - D - R - \Delta D_w \quad (4)$$

式中  $ET$  为腾发量; $P$  为降雨量; $I$  为灌水量,观测期内各处理均无灌水, $I$  值为 0; $U$ 、 $D$  分别为观测期内上行和下渗水量,两者差值近似取为 0, $R$  为地面径流损失量,试验中各小区均无排水, $R$  为 0,各量的单位均为 mm,上式简

化为:

$$ET = P - \Delta D_w \quad (5)$$

水分利用效率分别以作物群体水分利用效率  $WUE_p$  和生态系统水分利用效率  $WUE_e$  两种形式表示。 $WUE_p$  的计算公式为:

$$WUE_p = (M_a + M_u) / ET \quad (6)$$

式中: $M_a$ 、 $M_u$  分别为群体地上、地下部分的生物量,单位为 kg/hm<sup>2</sup>, $ET$  为腾发量。

$WUE_e$  的计算公式为:

$$WUE_e = NEP / ET \quad (7)$$

式中  $NEP$  为净生态系统生产力,单位为 kg/hm<sup>2</sup>, $ET$  为腾发量。

## 1.7 数据处理与分析

采用 Microsoft Office Excel 2003 对实验数据进行整理、作图。采用 SPSS19.0 对数据进行差异性、相关性分析和回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 产业沼气作物农田 CO<sub>2</sub> 排放量

5 个处理的农田 CO<sub>2</sub> 排放速率见表 1。在观测期裸地、玉米和杂交狼尾草农田 CO<sub>2</sub> 排放的变化趋势基本一致,大致随着降雨量的增加和气温的升高而增加。紫花苜蓿 8 月 24 日前与其他 4 个处理的变化趋势一致,8 月 24 日后随着降雨的减少和气温的下降,其他 3 种作物排放量减少,紫花苜蓿反而上升。其原因在于昆明 7、8 月份气温高、降雨多、湿度大,紫花苜蓿在高温高湿的情况下,生长受到抑制,到 8 月 24 日后随着气温逐步下降,降雨量逐渐减少,湿度降低,有利于紫花苜蓿的生长,其碳排放量仍处于较高水平。

表 1 产业沼气作物农田 CO<sub>2</sub> 排放速率

Table 1 Soil CO<sub>2</sub> emission of industrial biogas crops(g·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>)

观测日期 Date	5.20- 5.23	5.30- 6.02	6.08- 6.11	6.16- 6.19	6.26- 6.29	7.03- 7.06	7.13- 7.16	7.23- 7.26	8.02- 8.05	8.14- 8.17	8.24- 8.27	9.06- 9.09	9.16- 9.19	9.26- 9.29
曲晨 9 号 Quchen 9 maize	9.24± 0.09	9.04± 0.12	8.27± 0.59	9.58± 0.85	13.68± 1.71	9.24± 0.32	8.51±.51	12.63± 0.51	10.60± 0.41	12.86± 0.82	5.57± 0.26	5.69± 0.89	6.82± 0.05	6.28± 0.04
云瑞 88 号 Yunrui 88 maize	9.09± 0.48	8.86± 0.09	8.66± 0.59	9.79± 0.94	10.41± 1.31	10.14± 1.91	8.01± 0.31	13.48± 0.75	11.25± 0.54	14.31± 0.58	6.32± 0.66	6.65± 0.64	6.02± 0.08	5.96± 0.13
杂交狼尾草 Hybrid pennisetum	7.18± 0.12	7.43± 0.05	7.34± 0.52	7.82± 0.12	8.39± 0.86	6.95± 0.22	5.63± 0.18	11.39± 0.37	10.00± 0.77	13.03± 0.27	4.49± 0.23	6.03± 0.33	6.94± 0.07	6.35± 0.10
紫花苜蓿 Alfalfa	9.86± 0.06	10.01± 0.14	20.72± 0.44	12.23± 0.62	14.87± 0.43	12.82± 0.62	14.34± 0.43	20.69± 0.45	14.51± 1.15	22.31± 1.86	13.40± 1.09	21.62± 7.78	18.86± 0.02	17.56± 0.05
裸地 Bare land	6.15± 0.01	5.94± 0.10	5.81± 0.06	5.83± 0.03	5.62± 0.10	5.45± 0.07	4.32± 0.08	9.38± 0.11	8.76± 0.15	11.79± 0.08	2.40± 0.04	4.96± 0.07	5.13± 0.19	5.03± 0.22

观测期 5 个处理的农田土壤呼吸碳排放量见表 2。大小顺序依次为紫花苜蓿 (5 459.5 kg/hm<sup>2</sup>)>曲晨 9 号玉米 (3 313.0 kg/hm<sup>2</sup>)>云瑞 88 号玉米 (3 270.9 kg/hm<sup>2</sup>)>杂交狼尾草 (2 959.8 kg/hm<sup>2</sup>)>裸地 (2 377.0 kg/hm<sup>2</sup>)。和裸地相比,杂交狼尾草碳排放量是裸地的 125%、曲晨 9 号玉米是 139%、云瑞 88 号玉米是 138%、紫花苜蓿是 208%。曲晨 9 号玉米、云瑞 88 号玉米、杂交狼尾草间差异未达极显著,但它们与紫花苜蓿、裸地间达极显著差异。

紫花苜蓿碳排放量最大,与其他处理达显著性差异,原因在于紫花苜蓿是豆科植物,根系具有固氮能力,更有利于微生物的活动,另外紫花苜蓿根系深入地下(经 2013

年 9 月实测,主根可到地面下 2.0 m),可让深层土壤的碳释放出来,因此其 CO<sub>2</sub> 排放量较高。玉米和杂交狼尾草均为禾本科的 C4 植物,但杂交狼尾草的低于玉米,其原因既有作物本身的差异,也是因为玉米有中耕除草,土壤疏松,而杂交狼尾草观测期土壤未扰动,因此碳排放量较低。两个玉米品种排放量很接近,无显著性差异。

### 2.2 产业沼气作物的农田净生态系统生产力

产业沼气作物地上和地下部分的生物量、NPP、NEP 见表 2。为衡量单位碳排放的生产效率,计算出单位生物量碳排放系数,按不扣除和扣除裸土排放量计算,分别计为  $k_1$ 、 $k_2$ ,列于表 2。

表 2 产业沼气作物农田净生产力

Table 2 Net ecosystem productivity of industrial biogas crops(kg·hm <sup>-2</sup> )								
处理 Treatments	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Underground biomass	总生物量 Total biomass	净初级生产力 NPP	土壤呼吸碳排放量 R <sub>s</sub>	农田净生产力 NEP	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
曲晨 9 号 Quchen 9 maize	26559±288.2B	1187.5±12.3B	27746.5±286.7B	12485.9±129.0B	3313.0±223.1B	9172.9±375.2C	0.119	0.034
云瑞 88 号 Yunrui 88 maize	24915.2±66.8B	1159.5±23.1B	26074.7±70.3B	11733.6±31.6B	3270.9±66.5B	8462.7±172.0C	0.125	0.034
杂交狼尾草 Hybrid pennisetum	44234.1±245.5C	1305.7±20.0C	45539.7±264.0C	20492.9±118.8C	2959.8±59.7B	17533.1±142.6D	0.065	0.013
紫花苜蓿 Alfalfa	12050.0±736.8A	690.2±12.8A	12740.2±748.9A	5733.1±337.0A	5459.5±117.5C	273.6±134.1A	0.429	0.242
裸地 Bare land	0	0	0	0	2377.0±89.3A	-2377.0±107.7B	—	—

注:k<sub>1</sub>为单位生物量碳排放系数,k<sub>2</sub>为扣除裸地排放量单位生物量碳排放系数  
Note: k<sub>1</sub> represents coefficient of soil CO<sub>2</sub> emission per unit biomass; k<sub>2</sub> represents coefficient of soil CO<sub>2</sub> emission per unit biomass after deduction of bare land emission.

结果表明,NEP 的大小顺序是杂交狼尾草 (17 533.1 kg/hm<sup>2</sup>)>曲晨 9 号玉米 (9172.9 kg/hm<sup>2</sup>) >云瑞 88 玉米> (8 462.7 kg/hm<sup>2</sup>) >紫花苜蓿(273.6 kg/hm<sup>2</sup>)>裸地 (-2 377.0 kg/hm<sup>2</sup>)。4 种作物的 NEP 均为正值,说明种植过程作物吸收的 CO<sub>2</sub> 大于排放,其农田是 CO<sub>2</sub> 的汇。2 个玉米品种间 NEP 无显著差异,但玉米、杂交狼尾草、紫花苜蓿间均达显著性差异,杂交狼尾草 NEP 是紫花苜蓿 64 倍。

k<sub>1</sub> 值表明,种植生产 1 kg 的杂交狼尾草干物质,土壤排出的碳为 0.065 kg,而其他 3 种作物分别为 0.119、0.125、0.429 kg,k<sub>2</sub> 值表明将裸地的碳排放扣除后,则分别

为 0.034、0.034、0.013、0.242 kg。从减少温室气体排放角度看,种植杂交狼尾草的效益远高于玉米、紫花苜蓿等作物。

2.3 产业沼气作物农田水量平衡计算

玉米移栽和收获时各处理农田土壤剖面含水量见图 1。移栽时,各处理地下 0~10 cm 范围内土壤含水量较低,40 cm 较大,但在 50 cm 含水量又降低,50 cm 下逐渐增大。其原因应是移栽前的降雨 (5 月 1 日到 20 日降雨 38.2 mm) 渗入土壤,致使 40 cm 处的含水量增加,但降雨对 50 cm 处的影响较小,导致该点含水量较小。收获时,随着深度增加含水量也在增加,在 60 cm 以下含水量增量较小。

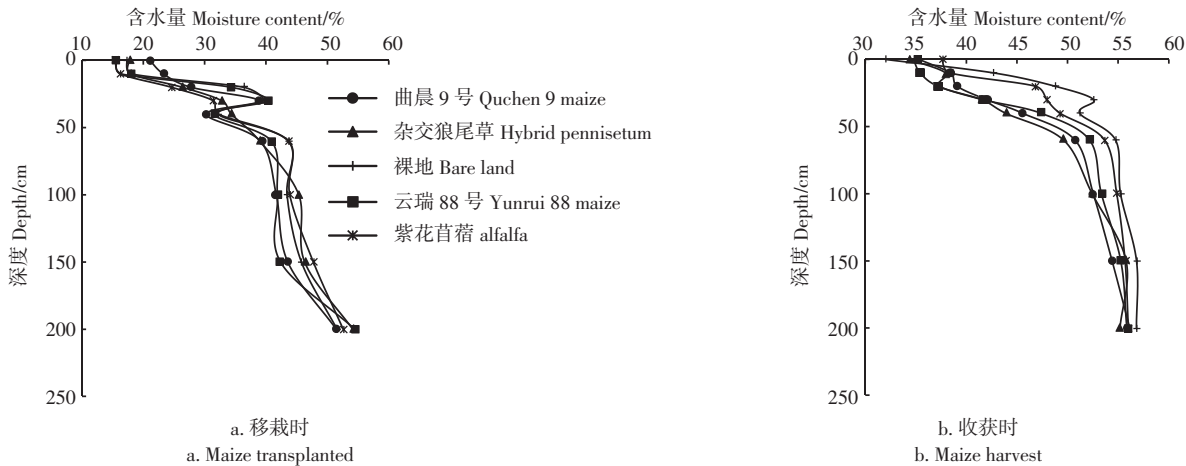


图 1 玉米移栽时和收获时农田土壤体积含水量  
Fig.1 Soil moisture content at maize transplanted and harvest(%)

移栽时耕作层(0~30 cm)的含水量在 15.43%~40.27% 之间,而收获时在 31.98%~52.58%之间;在 200 cm 深处,收获时的平均含水量比移栽时大 5.6%,该深度处在观测期含水量变化不大。

相同的深度,收获时农田土壤的含水量均大于移栽时的含水量,表明在观测期土壤总贮水量增加,其原因在于在观测期内,降雨较多,而且在 8 月 10 日到 12 日 3 天累计降雨达 99.8 mm、9 月 3 日降雨量达 16 mm,加之田间没有排水,雨水除腾发外,都渗入土壤补充了水分。

在观测期内降雨量为 594.6 mm。各处理在观测期内 0~200 cm 土壤贮水深变化量和腾发量(ET)见表 3。腾发量的大小排序为杂交狼尾草(418.29 mm)>曲晨 9 号(385.03 mm)>云瑞 88(384.47 mm)>紫花苜蓿(369.14 mm)>裸地(354.22 mm),杂交狼尾草的腾发量最大,紫花苜蓿的最小,仅比裸地大 14.92 mm。

表 3 观测期内 0~200 cm 土壤贮水深变化量和腾发量  
Table 3 ET and changes of soil water storage in 0~200 cm during observation period(mm)

深度 Depth	计算厚度 Calculated thickness	贮水深变化量 the changes of soil water storage/mm				
		曲晨 9 号 Quchen9 maize	云瑞 88 号 Yunrui 88 maize	杂交狼尾草 hybrid pennisetum	紫花 苜蓿 alfalfa	裸地 bare land
0						
100	100	14.69	19.13	18.37	22.11	19.63
200	100	13.22	10.98	15.51	22.15	18.50
300	100	7.24	2.12	9.89	19.39	12.73
400	100	9.21	8.57	9.14	16.74	16.00
600	200	26.94	27.08	20.13	27.02	30.00
1000	400	45.07	45.57	35.45	42.11	45.69
1500	500	54.31	60.97	41.47	47.42	57.13
2000	500	38.89	35.71	26.36	28.51	40.69
合计 total		209.57	210.13	176.31	225.46	240.38
降雨量 Precipitation		594.6	594.6	594.6	594.6	594.6
腾发量 ET		385.03	384.47	418.29	369.14	354.22

2.4 产业沼气作物水分利用效率

4 种产业沼气作物的  $WUE_p$ 、 $WUE_e$  见表 4。 $WUE_p$  大小排序为杂交狼尾草( $10.89\text{ kg/m}^3$ )>曲晨 9 号( $7.23\text{ kg/m}^3$ )>云瑞 88 玉米( $6.79\text{ kg/m}^3$ )>紫花苜蓿( $3.46\text{ kg/m}^3$ )。  $WUE_e$  大小顺序为杂交狼尾草( $4.19\text{ kg/m}^3$ )>曲晨 9 号( $2.38\text{ kg/m}^3$ )>云瑞 88( $2.20\text{ kg/m}^3$ )>紫花苜蓿( $0.06\text{ kg/m}^3$ ), 与 NEP 的排序相同。玉米、杂交狼尾草与紫花苜蓿间的  $WUE_p$ 、 $WUE_e$

均达极显著差异, 两个玉米品种间差异不显著。同为 C4 植物的杂交狼尾草和玉米的  $WUE_p$ 、 $WUE_e$  均比 C3 植物的紫花苜蓿大, 其中, 杂交狼尾草的  $WUE_p$  是紫花苜蓿的 3 倍左右。

综合 4 种作物的生物量、NEP、 $WUE_p$ 、 $WUE_e$  等指标, 在常规种植条件下杂交狼尾草要明显优于其他 3 种作物, 在产业沼气作物的推广中, 可优先种植。

表 4 4 种产业沼气作物水分利用效率  
Table 4 Water use efficiency of four industrial biogas crops

处理 Treatments	总生物量 Total biomass/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	净生态系统生产力 NEP/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	腾发量 $ET/\text{mm}$	群体水分利用效率 $WUE_p/( \text{kg}\cdot\text{hm}^{-3})$	生态水分利用效率 $WUE_e/( \text{kg}\cdot\text{hm}^{-3})$
曲晨 9 号 Quchen 9 maize	27 746.5±286.7B	9 172.9±375.2C	385.0±14.3AB	7.21±0.34B	2.38±0.18C
云瑞 88 号 Yunrui 88 maize	26 074.7±70.3B	8 462.7±172.0C	384.5±9.0AB	6.79±0.15B	2.20±0.11C
杂交狼尾草 Hybrid pennisetum	45 539.7±264.0C	17 533.1±142.6D	418.3±5.6B	10.89±0.16C	4.19±0.08D
紫花苜蓿 Alfalfa	12 740.2±748.9A	273.6±134.1A	369.2±6.9A	3.46±0.26A	0.06±0.08A
裸地 Bare land	0	-2 377.0±107.7B	354.2±4.0A	0	-0.67±0.07B

3 讨 论

沼气作物的碳排放量。本研究紫花苜蓿的  $\text{CO}_2$  排放变化范围在  $9.86\sim19.77\text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ , 庞莹莹等<sup>[6]</sup>在河北沽源牧场地区研究表明苜蓿整个生长季中土壤  $\text{CO}_2$  排放的变化范围是  $7.87\sim26.41\text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ , 两者接近。玉米的碳排放研究较多, 其强度也由于试验条件的不同而不同, 如韩广轩等在辽宁锦州测得的 C 排放值在  $0.52\sim18.05\text{ g/m}^2\cdot\text{d}$  范围内<sup>[7]</sup>, 牛灵安等在河北曲周试验站测得玉米的  $\text{CO}_2$  排放速率为  $6.19\sim22.52\text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ <sup>[8]</sup>。本研究结果在  $7.18\sim14.21\text{ g/m}^2\cdot\text{d}$  在上该范围内。杂交狼尾草碳排放国内未见报道, 和同属禾本科 C4 植物的玉米比较, 其排放应较为相似。杂交狼尾生物量虽比玉米高, 但种植期间未扰动土壤, 测得的碳排放值低于玉米, 但差异不显著。

沼气作物的农田 NEP。Hollinger 等<sup>[9]</sup>对玉米农田生态系统生长季的碳收支平衡研究表明, 玉米农田生态系统在 3 年的观测中均为碳汇, 净碳输入 NEP 变化幅度为  $7\,024\sim8\,804\text{ kg/hm}^2$ 。韩广轩等<sup>[7]</sup>测得春玉米农田 NEP 为  $11\,270\text{ kg/hm}^2$ , 李银坤等<sup>[20]</sup>在山东恒台县测得不同氮水平夏玉米的为  $4\,898.2\sim6\,766.8\text{ kg/hm}^2$ , 本文的研究结果和 Hollinger 的较为接近, 低于韩广轩等的研究, 高于李银坤等的结果。Gilmanov<sup>[21]</sup>等采用通量塔测定法测得紫花苜蓿的 NEP 值为  $1\,363.6\sim3\,272.7\text{ kg/hm}^2$ , 比本研究结果高很多。造成上述估算结果差异较大的主要因素是测定方法、监测时间长短、试验地气候和土壤类型以及田间管理等不同。

水分利用效率。现有玉米水分利用效率的研究多以经济产量衡量。肖俊夫等研究得出我国夏玉米的需水量(腾发量)在  $350\sim400\text{ mm}$  之间<sup>[22]</sup>, 本研究在  $385\text{ mm}$  左右, 和肖俊夫的一致, 玉米的生物产量一般在  $25\,000\text{ kg/hm}^2$  左右, 因此可认为本研究中的群体水分利用效率和目前研究结果一致, 结合玉米 NEP 的测定结果, 可认为本研究中生态系统水分利用效率和目前文献报道数据经计算后的结果一致。

本研究中紫花苜蓿的群体水分利用效率为  $3.45\text{ kg/m}^3$ , 高于孙洪仁等<sup>[23]</sup>归纳的建植 2 年以上(含 2 年)紫花苜蓿的水分利用效率  $1.4\sim2.9\text{ kg/m}^3$ 。其原因在于孙洪仁等归纳的文献的研究大多在干旱半干旱地区, 空气干燥, 作物需水量相对较高, 水分利用效率低。本研究小区底部未封闭, 紫花苜蓿根系较深,  $2\text{ m}$  以下的土壤也有可能为紫花苜蓿的生产提供了水分, 可能导致计算的水分利用效率偏大。结合紫花苜蓿 NEP 的测定结果, 本研究中生态系统水分

利用效率高于目前文献报道数据经计算结果, 原因在于试验条件的不同。

对杂交狼尾草水分利用效率的研究, 目前的报道主要集中在植物光合生理方面<sup>[24-25]</sup>。韦兰英等<sup>[24]</sup>在岩溶石漠化区以类玉米、紫花苜蓿、菊苣和杂交狼尾草 4 种牧草植物光合生理研究表明, 类玉米和杂交狼尾草的水分利用效率高于紫花苜蓿, 这也应证了本研究中玉米和杂交狼尾草的群体、生态水分利用效率高于紫花苜蓿的结论。

产气量水分利用效率。 $WUE_p$ 、 $WUE_e$  分别衡量了沼气作物的群体和生态水分利用效率。作为沼气作物其用水的效率最终体现在产气量, 将种植过程中所消耗的单位水分所生产的干物质发酵后的沼气产量定义为产气量水分利用效率。根据参考文献[11-12]的作物产气量, 测算得曲晨 9 号、云瑞 88 号、杂交狼尾草、紫花苜蓿产气量水分利用效率分别为  $2.88$ 、 $2.71$ 、 $6.21$ 、 $5.59\text{ m}^3/\text{m}^3$ , 可以看出杂交狼尾草的产气量水分利用效率明显高于其他 3 种作物。

沼气作物作为新兴的能源作物, 其栽培以获得高生物量为目标, 作为能源植物, 希望其净生态系统生产力和  $WUE_p$ 、 $WUE_e$  要高, 但目前这方面的研究较少。本研究以玉米的生长期为研究时段, 玉米收获后, 紫花苜蓿和杂交狼尾草仍然生长, 因此在今后的研究中, 针对紫花苜蓿和杂交狼尾草两种作物都为多年生草本植物, 可开展多年对比试验研究。

4 结 论

1) 观测的 5 个处理, NEP 的大小顺序是杂交狼尾草( $17\,533.1\text{ kg/hm}^2$ )>曲晨 9 号玉米( $9\,172.9\text{ kg/hm}^2$ )>云瑞 88 玉米( $8\,462.7\text{ kg/hm}^2$ )>紫花苜蓿( $273.6\text{ kg/hm}^2$ )>裸地( $-2\,377.0\text{ kg/hm}^2$ )。4 种作物的农田是  $\text{CO}_2$  的汇。2 个玉米品种间 NEP 无显著差异, 但玉米、杂交狼尾草、紫花苜蓿间均达显著性差异。

2) 供试的 4 种作物,  $WUE_p$  大小排序为杂交狼尾草( $10.89\text{ kg/m}^3$ )>曲晨 9 号( $7.21\text{ kg/m}^3$ )>云瑞 88 玉米( $6.79\text{ kg/m}^3$ )>紫花苜蓿( $3.45\text{ kg/m}^3$ )。  $WUE_e$  大小顺序为杂交狼尾草( $4.19\text{ kg/m}^3$ )>曲晨 9 号( $2.38\text{ kg/m}^3$ )>云瑞 88 玉米( $2.20\text{ kg/m}^3$ )>紫花苜蓿( $0.06\text{ kg/m}^3$ ), 与 NEP 的排序相同。玉米与其他处理间  $WUE_p$ 、 $WUE_e$  均达到极显著性差异, 2 个玉米间差异不显著。

3) 以生物量、NEP、 $WUE_p$ 、 $WUE_e$  四个指标来衡量, 在常规种植条件下杂交狼尾草要明显优于其他 3 种作物, 在产业沼气作物的推广中, 可优先种植。



## [参 考 文 献]

- [1] 程序,梁近光,郑恒受,等. 中国“产业沼气”的开发及其应用前景[J]. 农业工程学报,2010,26(5):1-6.  
Cheng Xu, Liang Jinguan, Zheng Hengshou, et al. Tapping of China's biogas industry and its perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [2] 段青松,何丙辉,张娅玲,等. 产业沼气作物的主要特征及种类特性[J]. 云南农业大学学报:自然科学版,2014,29(3):430-435.  
Duan Qingsong, He Binghui, Zhang Yaling, et al. Main characteristics of industrial biogas crops and their species typical properties[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural science edition, 2014, 29(3): 430-435. (in Chinese with English abstract)
- [3] Marcelo Z, Zaman H M, Anderson-Teixeira K J, et al. Water use efficiency of perennial and annual bioenergy crops in central Illinois[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2013, 118(2): 581-589.
- [4] Anthoni P M, Freibauer A, Kolbe O, et al. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2004, 121(3): 55-67.
- [5] Verma S B, Dobermann A, Cassman K G, et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2005, 131(1): 77-96.
- [6] Béziat P, Ceschia E, Dedieu G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2009, 149(10): 1628-1645.
- [7] 周立峰,冯浩. 不同灌水下复合肥对冬小麦产量及农田净生态系统生产力的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(7):31-36.  
Zhou Lifeng, Feng Hao. Effects of irrigation and compound fertilizer on yield of winter wheat and net ecosystem productivity of farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 31-36. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张宇,张海林,陈继康,等. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(9):3354-3360.  
Zhang Yu, Zhang Hailin, Chen Jikang, et al. Tillage effects on soil respiration and contributions of its components in winter wheat field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3354-3360. (in Chinese with English abstract)
- [9] Erickson J E, Soikaew A, Sollenberger L E, et al. Water use and water-use efficiency of three perennial bioenergy grass crops in Florida[J]. Agriculture, 2012, 2(4): 325-338.
- [10] Vanlooche A, Twine T E, Zeri M, et al. A regional comparison of water use efficiency for miscanthus, switchgrass and maize[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2012, 164(8): 82-95.
- [11] Heiermann M, Plöchl M, Linke B, et al. Biogas crops-part I: specifications and suitability of field crops for anaerobic digestion[J]. Agricultural Engineering International, 2009, 11: 1-17.
- [12] 李连华,孙永明,孔晓英,等. 刈割时间对杂交狼尾草成分及厌氧发酵性能影响试验[J]. 农业机械学报,2014,45(1):155-161.  
Li Lianhua, Sun Yongming, Kong Xiaoying, et al. Effect of growth stages on performance of anaerobic digestion and physico-chemical properties of pennisetum hybrid[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 155-161.
- [13] 危常州,王敬国,张福锁,等. 农田土壤温室气体释放通量的研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2001,5(4):267-270.  
Wei Changzhou, Wang Jingguo, Zhang Fusuo, et al. Measurement of greenhouse gases emission efflux in farmland[J]. Journal of Shihezi University (Natural science), 2001, 5(4): 267-270. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡立峰,王宝芝,李洪文. 土壤呼吸、农田 CO<sub>2</sub> 排放及 NEE 的比较研究[J]. 生态环境学报,2009,18(2):578-581.  
Hu Lifeng, Wang Baozhi, Li Hongwen. The comparative study of the soil respiration, CO<sub>2</sub> emission and NEE from the farmland in the North of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 578-581. (in Chinese with English abstract)
- [15] Larcher W. Physiological Plant Ecology[M]. 4th ed. Germany: Springer, 2003: 513.
- [16] 庞莹莹,邓波,张英俊,等. 苜蓿草地土壤呼吸及其对环境响应的研究[J]. 草地学报,2011,19(3):432-437.  
Pang Yingying, Deng Bo, Zhang Yingjun, et al. Soil respiration of alfalfa fields in the agro-pastoral ecotone of Northern China and its environment on responses[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(3): 432-437. (in Chinese with English abstract)
- [17] 韩广轩,周广胜,许振柱. 玉米农田生态系统土壤呼吸作用季节动态与碳收支初步估算 [J]. 中国生态农业学报, 2009,17(5):874-879.  
Han Guangxuan, Zhou Guangsheng, Xu Zhenzhu. Seasonal dynamics of soil respiration and carbon budget of maize (*Zea mays* L.) farmland ecosystem[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(5): 874-879. (in Chinese with English abstract)
- [18] 牛灵安,郝晋珉,张宝忠,等. 长期施肥对华北平原农田土壤呼吸及碳平衡的影响 [J]. 生态环境学报,2009,18 (3):1054-1060.  
Niu Lingan, Hao Jinmin, Zhang Baozhong, et al. Soil respiration and carbon balance in farmland ecosystems on North China Plains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 1054-1060. (in Chinese with English abstract)
- [19] Hollinger S E, Bernacchi C J, Meyers T P. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2005, 130(1): 59-69.
- [20] 李银坤,陈敏鹏,夏旭,等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报,2013,22(1): 18-24.  
Li Yinkun, Chen Minpeng, Xia Xu, et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(1): 18-24. (in Chinese with English abstract)
- [21] Gilmanov T G, Baker J M, Bernacchi C J, et al. Productivity and carbon dioxide exchange of leguminous crops: Estimates from flux tower measurements [J]. Agronomy Journal, 2014, 106(2): 545-559.
- [22] 肖俊夫,刘战东,陈玉民. 中国玉米需水量与需水规律研究 [C]//第十届全国玉米栽培学术研讨会. 2008:21-25.  
Xiao Junfu, Liu Zhandong, Chen Yumin. Study on the water requirement and water requirement regulation of maize in China [C]// The 10th national conference on corn cultivation. 2008: 21-25. (in Chinese with English abstract)
- [23] 孙洪仁,刘国荣,张英俊,等. 紫花苜蓿的需水量、耗水量、需水强度、耗水强度和水分利用效率研究[J]. 草业科学, 2005,22(12):24-30.  
Sun Hongren, Liu Guorong, Zhang Yingjun, et al. Water requirement rate, water consumption rate and water use efficiency of alfalfa[J]. Pratacultural Science, 2005, 22(12): 24-30. (in Chinese with English abstract)

[24] 韦兰英, 曾丹娟, 张建亮, 等. 岩溶石漠化区四种牧草植物光合生理适应性特征[J]. 草业学报, 2010, 19(3): 212–219.  
Wei Lanying, Zeng Danjuan, Zhang Jianliang, et al. The photosynthetic characteristics of four grasses in karst rock desertification areas[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2010, 19(3): 212–219. (in Chinese with English abstract)

[25] 莫凌, 黄玉清, 桂堂辉, 等. 5 个热带禾本科牧草品种的光合-光响应特性研究[J]. 草业科学, 2010, 27(9): 64–68.  
Mo Ling, Huang Yuqing, Gui Tanghui, et al. Photosynthesis-light response characteristics of five tropical forage cultivars[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(9): 64–68. (in Chinese with English abstract)

## Comparison of net ecosystem productivity of farmland and water use efficiency among different industrial biogas crops

Duan Qingsong<sup>1,2</sup>, He Binghui<sup>1\*</sup>, Qin Xiangdong<sup>3</sup>, Zi Shuhui<sup>4</sup>, Zhang Tao<sup>3</sup>, Yang Xiuping<sup>4</sup>, Liu Yunhua<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agriculture University, Engineering and Research Center for Industrial Biogas Technology of Yunnan Province University, Kunming 650201, China; 3. College of Basic Science and Information Engineering, Yunnan Agricultural University, Engineering and Research Center for Industrial Biogas Technology of Yunnan Province University, Kunming 650201, China; 4. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** As a kind of main material for biogas plants, industrial biogas crop plays an important role in energy and ecology area, in which ecological factors should be considered during the screening and planting of industrial biogas crop. Among those ecological factors, net ecosystem production (NEP) and water use efficiency (WUE) are the most important ones. NEP can indicate the status of carbon sinks or sources, and WUE can reflect the coupling of carbon and water cycles at ecosystem level. Screening those crops with high NEP and WUE will be beneficial to the decreasing of greenhouse gas emissions and the increasing of water using effect, which also can promote the development of biogas industry. To provide theoretical basis for the screening and scale planting of industrial biogas crop, the NEP and WUE of 4 crops in central Yunnan, including 2 types of maize (*Zea mays* L.) Quchen 9 and Yunrui 88, hybrid pennisetum (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) and alfalfa (*Medicago sativa*), were analyzed under normal planting conditions. The measurements were taken on the pilot farm (25°18'N and 102°45'E, with an elevation of 1978 m) of Yunnan Agriculture University, Kunming, China. The climate was classified as subtropical plateau monsoon climate, with a mean annual temperature of 15.3 °C and a mean annual precipitation of 979.3 mm. The soil was upland red soil. The experiment was arranged in a randomized block design with 3 replicates, and there were a total of 15 experimental plots with an area of 30 m<sup>2</sup> for each plot. All plots were surrounded and separated by concrete ridges. The ridges were 100 cm underground and 20 cm aboveground. The 2 breeds of maize were transplanted on May 20<sup>th</sup> and harvested on September 29<sup>th</sup>, 2013. Hybrid pennisetum and alfalfa were planted on March 20<sup>th</sup>, 2012 by cuttage propagation and seed reproduction separately, and both were reaped 3 times on May 20<sup>th</sup>, July 12<sup>th</sup> and September 29<sup>th</sup>, 2013, respectively. The NEP and WUE were investigated during the growing period of maize, from May 20<sup>th</sup> to September 29<sup>th</sup>, 2013. For hybrid pennisetum and alfalfa, the total amount of the last 2 harvests was the aboveground biomass. Soil core method (Luoyang shovel) was used to obtain the root samples of hybrid pennisetum and alfalfa in 0–90 cm soil layer. The underground biomass of 2 crops was determined on May 20<sup>th</sup> and September 29<sup>th</sup>, 2013 respectively, and the difference for the 2 times was the increasing amount of the underground biomass. The roots were obtained when the corn was harvested, and the underground biomass was determined by drying the roots. Soil water content was observed with a PR2 soil moisture meter. Soil respiration was measured by the soda lime absorption method and corrected by the static closed chamber. The water evaporation was detected by the no-weighting-lysimeter. The meteorological indices, including temperature and rainfall, were recorded with a weather station. The NEP was calculated by subtracting the quantity of soil respiration from net primary productivity. The evapotranspiration, the population water use efficiency(WUE<sub>p</sub>), and the ecosystem water use efficiency (WUE<sub>e</sub>) were estimated by water balance equation. The results showed that: 1) The NEP decreased in this order: hybrid pennisetum (17 533.1 kg/hm<sup>2</sup>) > maize Quchen 9 (9 172.9 kg/hm<sup>2</sup>) > maize Yunrui 88 (8 462.7 kg/hm<sup>2</sup>) > alfalfa (273.6 kg/hm<sup>2</sup>) > bare land (–2 377.0 kg/hm<sup>2</sup>). The data showed that the 4 industrial biogas crops acted as a CO<sub>2</sub> sink. No significant difference in NEP could be observed between the 2 breeds of maize, while significant difference at the 0.01 level was showed between any 2 crops of maize, hybrid pennisetum and alfalfa. 2) The WUE<sub>p</sub> of the crops decreased as follows: hybrid pennisetum (10.89 kg/m<sup>3</sup>) > maize Quchen 9 (7.23 kg/m<sup>3</sup>) > maize Yunrui 88 (6.79 kg/m<sup>3</sup>) > alfalfa (3.46 kg/m<sup>3</sup>). And the WUE<sub>e</sub> decreased in the same order: hybrid pennisetum (4.19 kg/m<sup>3</sup>) > maize Quchen 9 (2.38 kg/m<sup>3</sup>) > maize Yunrui 88 (2.20 kg/m<sup>3</sup>) > alfalfa (0.06 kg/m<sup>3</sup>). No significant difference could be observed in WUE<sub>p</sub> and WUE<sub>e</sub> between the 2 breeds of maize, while significant difference at the 0.01 level was showed between any 2 crops of maize, hybrid pennisetum and alfalfa. Comprehensively considering biomass, NEP, WUE<sub>p</sub> and WUE<sub>e</sub>, the hybrid pennisetum demonstrates obvious advantage over other 3 crops under normal planting conditions and is more preferential to be popularized and cultivated.

**Keywords:** crops; ecosystems; biogas; industrial biogas crops; net ecosystem productivity; population water use efficiency; ecosystem water use efficiency