

水稻物质生产对稻田甲烷排放的影响*

黄耀^x, $\varrho\ 3\ 2\ \xi\ 0\ \rho\ \partial\ us\ \xi\ 7\ 7\ ^y$, $T_6\ \xi\ 2\ \omega\ \in\ u\ T\chi\ \varphi\sigma\ 6\ ^y$

(xu 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 $y\ x\ a\ u\ B$;
 $y\ u$ 美国莱斯大学生态与进化生物学系, 德克萨斯 $\Delta\ x\ a\ B\sim xE\ Z\ y\ p$

摘 要 H 以研究水稻物质生产对稻田甲烷排放影响为目的的大田与盆栽试验于 $xZZA\sim xZZB$ 年在美国德克萨斯州进行。对同期观测的稻田甲烷排放量与水稻干物质积累资料的分析表明, 在类似的气候、土壤及水稻栽培管理条件下, 稻田甲烷排放的季节总量随水稻生产力水平的提高而增加; 甲烷日排放通量与水稻干物质积累呈正相关; 水稻生长中、后期的物质生产对甲烷排放的贡献大于前期。

关键词 I 温室气体 Θ 甲烷 Θ 稻田 Θ 水稻物质生产

中图分类号 $H\ x\ x\ x$ 文献标识码 IE 文章编号 $H\ x\ a\ a\ v\sim \omega\ y\ \Gamma\ \Delta\ o\ x\ Z\ Z\ Z\ p\ u\ A\sim \omega\ x\ B\ v\sim \omega\ B$

甲烷 ($\Pi\Phi\ \Delta$) 是仅次于二氧化碳 ($\Pi\phi\ ^y$) 的重要温室气体之一 ^{$\theta\ x\ \kappa$} 。 $\varrho\ 3\ \rho\varphi\sigma^{\theta\ x\ \kappa}$ 认为, 它对全球气候变暖的贡献可达 $x\ B\%$ 。据估计, 全球水稻田甲烷年排放量约 $\Gamma\omega\ \alpha\upsilon\ ^{\theta\ y\ \kappa}$ ($x\ \alpha\upsilon\ K\ x\omega\ ^\Gamma\ ^s$), 它占大气甲烷源的 $x\omega\ \%$ $\sim$ $z\omega\ \%$ ^{$\theta\ z\ ^\Delta\ \kappa$} 。国际水稻所预测 ^{$\theta\ B\ \kappa$} , 到 $y\omega\ y\omega$ 年, 全球水稻产量必须从 $x\ Z\ Z\ \omega$ 年的 $\Delta\ x\ \times\ x\omega\ ^\Gamma\ ^s$ 增加到 $\Delta\ E\ x\ \times\ x\omega\ ^\Gamma\ ^s$ 方可满足不断增长的人口需要。而水稻播种面积与产量的增加很可能导致全球甲烷释放的增加 ^{$\theta\ \Gamma\ \kappa$} 。因此, 深入研究水稻物质生产对甲烷排放的影响具有重要的意义。

研究 ^{$\theta\ \Delta\ \kappa$} 证明, 水稻植株对稻田甲烷的产生、氧化及排放起着决定性的作用。一方面, 水稻生长期间, 其根系分泌物为甲烷菌提供基质, 促进根区甲烷的产生。另一方面, 水稻植株体为甲烷排放提供通道。在稻田甲烷的总排放量中, 有 $B\upsilon\ \%$ $\sim$ $Z\alpha\upsilon\ \%$ 被认为是通过水稻植株排放的 ^{$\theta\ E\ \kappa$} 。本研究的目的在于揭示水稻物质生产对甲烷排放的影响以及水稻生产发育与甲烷排放的关系。

x 材料与方法

$x\ \omega\ x$ 大田与盆栽试验

试验于 $xZZA$ 年— $xZZB$ 年在美国德克萨斯州进行。大田试验区设在德州农工大学农业试验与推广中心 ($xZZA$ 年— $xZZB$ 年), 盆栽试验设在莱斯大学校园内 ($xZZB$ 年), 两地相距约 $x\ y\omega\ \omega\ 1$ 。供试土壤含砂量为 $y\ z\ \%$ $\sim$ $y\ E\ \%$ 。在水稻生长季内 (A 月— Z 月), 日平均气温为 $y\ B\ u\ B\ ^\circ\ C$, 日平均太阳辐射量为 $A\ x\ v\ \Sigma\ \chi\upsilon\ 1\ ^y$, 降水总量为 $E\alpha\upsilon\ 1\ 1$ 左右。

大田试验供试品种为 $\epsilon\ \xi\ 6\ 7$ 、 $\partial\sigma\ 1\ 3\ 2\ 8$ 、 $\partial\ \xi\ 0\ \sigma\ 0\ 0\ \sigma\ o\ x\ Z\ Z\ A\ p\ s\ \in\ \xi\ 6\ 7$ 、 $P\sigma\ 0\ 0\ \xi$ 、 $\partial\sigma\ 1\ 3\ 2\ 8$ 、 $\Pi\ b\sim\ 4\ 6\ \sigma\ 7\ 7\ o\ x\ Z\ Z\ B\ p$ 。每个小区面积为 $\Delta\ x\upsilon\ 1\ ^y$ 。盆栽试验供试品种为 $\epsilon\ \xi\ 6\ 7$ 、 $P\sigma\ 0\ 0\ \xi$ 、 $\partial\sigma\ 1\ 3\ 2\ 8$ 、 $\partial\ \xi\sim\ 0\ \sigma\ 0\ 0\ \sigma\ o\ x\ Z\ Z\ B\ p$ 。盆钵高度为 $y\ y\ \pi\ 1$, 上口与底部直径分别为 $y\ B\ \pi\ 1$ 与 $x\ E\ \pi\ 1$ 。盆内土层厚度为 $x\ x\ \sim\ x\ B\ \pi\ 1$, 该土取自于 $x\ Z\ Z\ B$ 年大田试验区。据 $x\ Z\ Z\ x$ 年不同品种下甲烷排放量的研究 ^{$\theta\ Z\ \kappa$} , 品种 $\epsilon\ \xi\ 6\ 7$ 、 $P\sigma\ 0\ 0\ \xi$ 、 $\Pi\ b\ 4\ 6\ \sigma\ 7\ 7$ 表现出较强的甲烷排放能力, 而品种 $\partial\sigma\ 1\ 3\ 2\ 8$ 及 $\partial\ \xi\ 0\ \sigma\ 0\ 0\ \sigma$ 的甲烷排放量明显低于上述 z 个品种。

B 个供试品种的生育期大体相仿。 A 月上、中旬用机械直播, $x\omega\ \rho$ 左右出苗, Δ 月上、

* 本研究由美国航空航天总署及美国农业部资助。
收稿日期 $H\ x\ Z\ Z\ E\sim \omega\ Z\sim x\ E$

中旬抽穗, E 月中旬成熟。播种后 Γ 周开始, 持续淹水至成熟前 $xw\rho$ 左右落干, 田间水深保持在 $E\sim xy\pi^1$ 。氮肥以尿素为主, 施用量为 $x\Gamma B\sim xZu\omega\omega\ \vartheta\upsilon\varphi^1\ ^y$, 无有机肥施加。

$x\iota y$ 甲烷样品的采集与分析

大田甲烷样品的采集使用不锈钢静态封闭箱, 横截面积为 $wu\kappa Z\Delta^1\ ^y$, 箱体高度随作物高度而增加。持续淹水前, 在各采样点预先放置并固定一个不锈钢底座作为水封, 采样时, 将采样箱罩在该底座上, 箱内装有微型风扇以保持气体均匀混合。盆栽试验的采样使用塑料圆柱形静态封闭箱, 横截面积为 $wu\kappa B^1\ ^y$, 箱体高度为 wrE^1 。箱底内直径与盆钵上口外直径一致, 以保持良好的密封性。采样时, 将该密封箱套在盆钵上, 水深超过盆钵高度 $\Gamma\sim E\pi^1$ 。大田采样各设两个重复, 盆栽采样各设 z 个重复。各采样点每次连续采样 B 个, 每个间隔 $B^1\ \chi^2$ 。样品量为 $B\kappa\upsilon^1\ \vartheta$, 每周采样 y 次。

样品的甲烷混合比用日本产气相色谱仪 $os\varphi\chi^1\ \xi\rho^1\ \xi p$ 检测。通过对每组 B 个样品的甲烷混合比与相对应的采样间隔时间($wB, xw, xB, yw^1\ \chi^2$) 进行直线回归, 可求得该采样点的甲烷排放速度。继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、甲烷分子量等, 求得单位面积甲烷排放量。

$xu\kappa$ 水稻植株生物量测定

大田水稻植株采样每周一次, 仅取地上部分。每次在各小区内随机选取 $y\sim z$ 个点,

共取 yw 株(包括三叶以上的大分蘖)左右。回实验室洗净, 并分成 z 部分 H 绿色茎叶、枯黄叶片及穗部。盆栽试验每个品种每次取两盆作为重复, 每周 x 次。除地上部分与大田采样相同外, 同时收集根系生物量。所有植株样品均在 $Zu\ ^\circ C$ 下烘干 $AE\varphi$ 并称重。将所采植株的单株干重乘以甲烷采样箱内植株数, 可估算出该箱内水稻植株的生物量。

y 结果与讨论

yw 甲烷季节性排放总量与水稻群体物质生产水平

表 x 给出 z 个试验不同品种的水稻生物量及甲烷排放总量。这 z 个试验代表了不同的水稻生产力水平 H 低生产力 ($xZZB$ 年大田)、中等生产力 ($xZZA$ 年大田) 及高生产力 ($xZZB$ 年盆栽)。其相应的地上部分生物量分别为 $\Gamma xx\pm Ax\ ZZT\pm\Gamma z$ 及 $xBZx\pm E\Gamma\upsilon\upsilon^1\ ^y$ 。与此相一致, 甲烷排放量分别为 $Zu\Gamma\pm yuBs\ yw\iota Z\pm Zuw$ 及 $zxu\Gamma\pm\Delta u\omega\ \upsilon\upsilon^1\ ^y$ 。除此以外, 品种 $\epsilon\ \xi^{67}$ 、 $P_{\sigma 0}\xi$ 及 $\Pi_{b\ 46}\sigma^{77}$ 显示出较高的甲烷排放能力, 这与 $xZZz$ 年的试验结果 ^{$\theta Z\kappa$} 一致。

由表 x 给出的数据, 可得到甲烷排放量与水稻地上部分生物量的关系(图 x)。图 x 中 γX 是一个无量纲的品种指数, 它用来表征不同品种间甲烷排放量的差异(VI 的定义与推导将另文刊出)。这里, 品种 $\epsilon\ \xi^{67}$ 、 $P_{\sigma 0}\xi$ 及 $\Pi_{b\ 46}\sigma^{77}$ 的 γX 值为 xuB , 其余 y 个品种为

表 x 不同生产力水平下水稻物质生产与甲烷排放量(德克萨斯州, $xZZA\sim xZZB$)

品种	地上部分干重 $ov\ /\ ^1\ ^y p$			根系干重 $ov\ /\ ^1\ ^y p$	甲烷排放量 $ov\ /\ ^1\ ^y p$		
	$xZZA-T^{\xi p}$	$xZZB-T$	$xZZB-\phi^{\circ p}$		$xZZA-T$	$xZZB-T$	$xZZB-\phi$
$\epsilon\ \xi^{67}$	$Zu\Gamma$	$\Gamma\Delta x$	$x\ \Delta yA$	$B\kappa\Gamma$	$zz\ u\Gamma E$	$xyu\kappa\Gamma$	$A\kappa u\Gamma z\upsilon$
$\vartheta\sigma^1\ 328$	$x\ u\Delta x$	Γyw	$x\ BBE$	$B\kappa A$	$xBu\Gamma Z$	$Eu\Gamma w$	$y z\ u\gamma\Gamma$
$\vartheta\xi_{0\sigma 0}\sigma$	$x\ u\alpha y$		$x\ AE\Delta$	$A\Gamma A$	$xx\ u\kappa z$		$y\Gamma u\gamma x$
$P_{\sigma 0}\xi$		BBE	$x\ BZ\Gamma$	Byy		$\Gamma u\kappa E$	$z\Gamma u\alpha v$
$\Pi_{b\ 46}\sigma^{77}$		$BZ\Gamma$				$xx\ u\Delta A$	
平均值	ZZT	Γxx	$x\ BZx$	$Bx A$	$yw\iota Z$	$Zu\Gamma$	$zx\ u\Gamma$
标准差	Γz	Ax	$E\Gamma$	yZ	Zuw	$y\ uB$	$\Delta u\omega$
变异系数 $\theta^0 p$	ΓuA	$\Gamma u\Delta$	BuA	$Bu\Delta$	$Az\ u\kappa$	$yBuB$	$yy\ uB$

ξp $T H$ 大田试验 $\theta o p$ ϕH 盆栽试验。

xu 。从表 x 与图 x 可以看出,在类似的气候、土壤及栽培管理条件下,给定品种的甲烷排放量随水稻生产力的提高而增加。

yuy 甲烷日排放通量与水稻干物质积累

图 y 给出 z 个试验同一水稻品种($\partial\sigma_{1328}$)的干物质积累与甲烷日排放通量的季节性变化。在灌水初期,甲烷日排放量较低。其主要原因是土壤的氧化还原电位较高,抑制了土壤中甲烷的产生 θ_{xx} 。大约灌水后 z 个星期,甲烷日排放量逐渐增加,到抽穗后开始下降(图 y)或略有增加(y),或基本保持不变(y)。意大利 θ_{xx} 、印度 θ_{xy} 等地的田间测定也有类似的趋势。由图 y 还可以看出,抽穗后甲烷排放的趋势与水稻营养器官的干物质积累趋势相类似。 $\partial\sigma_{1328}$ 的实验指出,水稻叶鞘的微孔是甲烷排放的主要通道。抽穗后,水稻植株不再有新叶抽出,甲烷排放或许受到这些通道的限制。另一方面,土壤及水土界面中甲烷氧化量的增加,也可能导致抽穗后甲烷排放的减少 θ_{xx} 。

$\partial\sigma_{1328}$ 与 $\partial\sigma_{1328}$ 的研究指出,在湿地生态系统中,甲烷的排放率与植物的光合作用呈正相关。本研究的观测结果表明,水稻田甲烷的日排放量与植株生物量的累积呈正相关。图 z 给出两组水稻品种营养器官生物量与甲烷日排放量的相关关系。图 z 中资料来自于种植品种 $\partial\sigma_{1328}$ 与大田小区及盆钵,图 z 中资料来自于种植品

种 ϵ_{67} 、 $P\sigma_{05}$ 及 $\Pi_{346}\sigma_{77}$ 的小区与盆钵。由图 z 可以看到,当甲烷日排放量达到 $x\sigma_{1328}$ 左右时,其排放通量不再随植株生物量的增加而增加。必须注意到,甲烷日排放通量为 $x\sigma_{1328}$ 左右的资料均来自于 $xZZB$ 年的盆栽试验。一种可能的解释是 H 在这种特定的品种、土壤及栽培条件下,土壤中的甲烷菌或许是限制甲烷产生 v 释放的因子,而不是受基质的限制。

考虑品种间甲烷排放能力的差异,仍以品种指数(γX)为 xu 及 xu 来表征这两组品种的甲烷排放差异,可得到 z 个试验所有供试品种营养器官生物量与甲烷日排放量的线性关系(图 A)。其线性决定系数 ϵ_{67} 为 $wu\sigma_{1328}KZp$ 。 σ_{1328} 等 θ_{xx} 曾报道,土壤中甲烷的产生量随植株根系生物量增加而增加。采用图 A 类似的方法,可从 $xZZB$ 年盆栽试验资料得到甲烷日排放量与水稻根系生物量之间的线性关系(图 Bo)。其决定系数 ϵ_{67} 为 $wu\sigma_{1328}KZp$ 。

图 z 与图 A 的结果表明 H 水稻田甲烷排放

γX 为无量纲的品种指数

图x 甲烷季节性排施总量与水稻地上部分生物量 θ_{xx} 的关系

ϵ_{67} 分别为 $xZZA$ 、 $xZZB$ 年大田试验及 $xZZB$ 年盆栽试验。供试品种为 $\partial\sigma_{1328}$ 。箭头所示为抽穗期

图y 水稻群体干物质积累与甲烷日排放通量的季节性变化

$\theta\psi\kappa\ u\ \Pi\pi\sigma\ s\ xZEE\Theta\gamma\ H\gamma ZZ\sim z\gamma Du$
 $\theta A\kappa\ \Phi\ 3\ 9\ u\varphi\ 3\ 2\ \Psi\ \alpha\ s\ \Psi\ 2\ \omega\chi\ 7\ T\ \Psi\ S\ \xi\ 2\ \rho\ \Sigma\ 1\ \varphi\ 0\ \xi\ 9\ 1\ 7\ \Psi\ \Psi$
 $\alpha\ \Sigma\ \rho\ 1\ u\varphi\ s\ \Pi\chi\ 1\ \xi\ s\ \Pi\varphi\ \xi\ 2\ u\sigma\ H\ \alpha\ \varphi\sigma\ X\beta\ \text{III}\ s\ \pi\chi\sigma\ 2\ s\ \chi\ \chi\tau$
 $\Xi\ 1\ \sigma\ 7\ 1\ 1\ \sigma\ 2\ 8\ \theta\ \epsilon\ \kappa\ u\ \Pi\ \xi\ 1\ 0\ \omega\chi\ u\sigma\ \beta\ 2\ 0\ \sigma\ 6\ 7\ \chi\ 3\ \varphi\ 0\ \sigma\ 7\ s\ \vartheta\ \sigma\ 1$
 $\zeta\ 3\ 6\ \omega\ s\ xZZ\omega u$
 $\theta B\kappa\ X\ 8\ \sigma\ 2\ 2\ \xi\ s\ \chi\ 2\ \xi\ 0\ \varrho\chi\sigma\ \varrho\ \sigma\ 1\ \sigma\ 6\ \pi\varphi\ X\ 7\ 8\ \chi\ 9\ 8\ \sigma\ s\ X\varrho\ \varrho\ X\ \alpha\ 3\ 1\ \xi\ 0\ \rho$
 $\gamma\alpha\alpha\omega\ \xi\ 2\ \rho\ \text{O}\sigma\ 3\ 3\ 2\ \rho\ s\ X\varrho\ \varrho\ X\ s\ \epsilon\ \xi\ 2\ \chi\ \xi\ s\ \varphi\varphi\chi\ 1\ 4\ \chi\ \sigma\ 1\ xZZZu$
 $\theta\Gamma\kappa\ \text{O}\ 3\ 9\ 1\ 1\ \xi\ 2\ \Xi\ T\ s\ \Xi\ u\ 6\ 3\ 2\ 3\ 1\ \chi\tau\ \xi\ 7\ 1\ \sigma\pi\ 7\ 3\tau\ 1\ \sigma\ 0\ \xi\ 2\ \rho\ 6\chi\sigma$
 $\pi\ 9\ 0\ 8\ \chi\ 6\ \xi\ s\ \chi\ 2\ \xi\ 2\ \rho\ \xi\ 7\ 7\ 3\ \pi\chi\ \xi\ s\ \sigma\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ \theta\psi\kappa\ u$
 $\text{O}\chi\ 1\ u\sigma\ \pi\sigma\ 1\ \chi\ 8\ 6\ 3\ s\ xZZx\ \Theta\alpha\ B\text{H}\Gamma B\sim EEu$
 $\theta\Delta\kappa\ s\ \pi\varphi\ddot{u}\ 8\ 1\ \Phi\ s\ s\ \pi\varphi\ 0\ 3\ \rho\ 0\ s\ \varphi\ s\ \xi\ 2\ \rho\ \varrho\ \sigma\ 2\ 2\ \sigma\ 0\ \sigma\ u\ \Phi\ u\ \varrho\ 3\ 0\ \sigma\ 3\ 7$
 $4\ 0\ \xi\ 2\ 8\ 7\ \chi\ 2\ \sigma\ u\ 9\ 0\ \xi\ s\ \chi\ 2\ u\ 8\ \varphi\sigma\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \tau\ 9\ 2\ 8\ 3\ 8\ \varphi\sigma\ \xi\ s\ \mu$
 $1\ 3\ 7\ 4\ \varphi\sigma\ 0\ \sigma\ s\ X\ \text{H}\ \alpha\ 6\ \xi\ \pi\sigma\ T\ \xi\ 7\ \Sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ 0\ s\ \varphi\ 0\ \xi\ 2\ 8\ 7\ s$
 $\sigma\ \rho\ \xi\ \sigma\ 0\ \sigma\ \alpha\ u\ P\ u\ s\ \varphi\ \xi\ 0\ \omega\sigma\ s\ \Sigma\ \Xi\ \Phi\ 3\ 0\ 0\ \xi\ 2\ \rho\ \xi\ 2\ \rho\ \Phi\ \Xi$
 $\epsilon\ 3\ 3\ 2\ 2\ \sigma\ s\ \theta\ \epsilon\ \kappa\ s\ \Xi\ \xi\ \rho\ \sigma\ 1\ \chi\tau\ \varphi\ 0\ \sigma\ 7\ 1\ s\ X\ \pi\ \omega\ \vartheta\ \zeta\ uZZx\ H$
 $yZ\sim\Gamma z\ u$
 $\theta E\kappa\ s\ \pi\varphi\ddot{u}\ 8\ 1\ \Phi\ s\ s\ \sigma\chi\ \sigma\ \delta\ s\ \xi\ 2\ \rho\ \Pi\ 2\ 6\ \xi\ \rho\ \varrho\ u\ \varphi\ 0\ 3\ \pi\sigma\ 1\ \sigma\ 1$
 $\chi\ 2\ 0\ 3\ 0\ 0\ \sigma\ \rho\ \chi\ 2\ \tau\ 6\ 3\ 1\ \xi\ s\ \chi\ 2\ \xi\ s\ \rho\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 3\ 7\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \chi\ 2\ \varrho\chi\sigma$
 $4\ \xi\ \rho\ \rho\chi\tau\ \theta\psi\kappa\ u\ \text{O}\chi\ 1\ u\sigma\ \pi\sigma\ 1\ \chi\ 8\ 6\ 3\ s\ xZEE\Theta\Delta\ H z z\sim B\kappa\ u$
 $\theta Z\kappa\ s\ \xi\ 7\ 7\ \varrho\ \vartheta\ \xi\ 2\ \rho\ T\chi\ \varphi\sigma\ T\ \epsilon\ u\ \epsilon\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ \tau\ 6\ 3\ 1$
 $\alpha\ \sigma\ 2\ \xi\ 7\ \varrho\chi\sigma\ \tau\chi\ \rho\tau\ H\ \xi\ \tau\chi\ \sigma\ \longrightarrow\ \sigma\ \xi\ 6\ 7\ 8\ 9\ \rho\ s\ u\ X\ \text{H}\ \Pi\chi\ 1\ \xi\ s\ \sigma$
 $\Pi\varphi\ \xi\ 2\ u\sigma\ \xi\ 2\ \rho\ \varrho\chi\sigma\ \alpha\sigma\ \rho\tau\ \varphi\sigma\ 2\ u\ s\ X\ \text{u}\ 6\ \xi\ 1\ \Omega\ \alpha\ s\ \vartheta\ \sigma\ \sigma$
 $\Phi\ \beta\ s\ \xi\ 2\ \rho\ \eta\chi\ \omega\ \xi\ \vartheta\ \Phi\ \rho\ s\ s\ 4\ 6\ \chi\ u\sigma\ \sigma\ \vartheta\ \sigma\ 1\ \zeta\ 3\ 6\ \omega\ uZZBH$
 $A\Gamma\sim BZu$
 $\theta x\omega\ \delta\ \xi\ 2\ u\ \eta\ \varphi\ s\ P\omega\ \xi\ 9\ 2\ \sigma\ \varrho\ P\ s\ \epsilon\ \xi\ 7\ 7\ \pi\varphi\sigma\ 3\ 2\ \varphi\ \Phi\ s\ \xi\ 2\ \rho$
 $\varphi\ \xi\ 8\ 6\ \chi\tau\omega\ \vartheta\ \Phi\ u\ s\ 3\ \chi\ 6\ \sigma\ \rho\ 3\ 2\ \xi\ 2\ \rho\ 4\ \Phi\ \sigma\tau\tau\pi\sigma\ 7\ 3\ 2\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma$
 $4\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ 2\ 2\ \chi\ \xi\ \tau\ 6\ 3\ 3\ \sigma\ \rho\ \rho\ \varrho\chi\sigma\ 7\ 3\ \chi\ \theta\psi\kappa\ s\ s\ 3\ \chi\ 0\ s\ \pi\chi\sigma\ 2\ \pi\sigma$
 $s\ 3\ \pi\chi\sigma\ 3\ 7\ \Xi\ 1\ \sigma\ \chi\tau\ \xi\ \Psi\ 9\ 6\ 2\ \xi\ 0\ s\ xZZx\ \Theta\chi\ u\ y\ p\ H z\ E y\sim z\ E B u$
 $\theta x\kappa\ s\ \pi\varphi\ddot{u}\ 8\ 1\ \Phi\ s\ s\ \sigma\chi\ \sigma\ \delta\ s\ \xi\ 2\ \rho\ \Pi\ 2\ 6\ \xi\ \rho\ \varrho\ u\ X\ \tau\ 9\ \sigma\ 2\ \pi\sigma\ 3\ \tau$
 $7\ 3\ \chi\ 8\ \sigma\ 1\ 4\ \sigma\ \xi\ 9\ 6\ \sigma\ 3\ 2\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ \tau\ 6\ 3\ 1\ \varrho\chi\sigma\ 4\ \xi\ \rho\ 3$

$\tau\chi\ \rho\tau\ \theta\psi\kappa\ s\ \text{O}\chi\ 1\ u\sigma\ \pi\sigma\ 1\ \chi\ 8\ 6\ 3\ s\ xZZ\omega\ \Theta\alpha\ x\ H\Delta\Delta\sim ZBu$
 $\theta x\gamma\kappa\ \varphi\ \xi\ 0\ \xi\ 1\ \varphi\ \xi\ 0\ P\ \Pi\ s\ \epsilon\ \chi\ 6\ \xi\ \Xi\ \varphi\ s\ \xi\ 2\ \rho\ s\ \chi\ 2\ \varphi\ \xi\ s\ \Omega\ \sigma\ \xi\ 0\ u$
 $\epsilon\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ 0\ 8\ \rho\ u\sigma\ \tau\ 6\ 3\ 1\ X\ \rho\chi\ \xi\ 2\ 4\ \xi\ \rho\ 3\ \tau\chi\ \rho\tau\ u\ X\ \text{H}\ \Pi\Phi\ \Delta$
 $\xi\ 2\ \rho\ \vartheta\ \varphi\ \text{H}\text{T}\ 0\ 3\ 0\ \xi\ 0\ \Sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ \xi\ 2\ \rho\ \Pi\ 2\ 8\ 6\ 3\ 0\ 7\ \tau\ 6\ 3\ 1\ \varrho\chi\sigma$
 $T\chi\ \rho\tau\ \xi\ 2\ \rho\ 3\ 8\ \varphi\sigma\ \Xi\ u\ 6\ \chi\tau\ 9\ 0\ 8\ 9\ 6\ \xi\ 0\ \xi\ 2\ \rho\ X\ \rho\ 9\ 7\ 8\ 6\ \chi\ \xi\ s\ s\ 3\ 9\ 6\ \pi\sigma\tau$
 $\alpha\sigma\ \rho\tau\ \epsilon\ \chi\ 2\ \xi\ 1\ \chi\ \Omega\ s\ \epsilon\ 3\ 7\ \chi\tau\ \Xi\ s\ \xi\ 2\ \rho\ s\ \xi\ 7\ 7\ \varrho\ \rho\ \theta\ \epsilon\ \kappa\ s$
 $\zeta\ \phi\ \Omega\ s\ \vartheta\ P\ \phi\ \varphi\ 0\ 0\ \chi\ \varphi\sigma\ 7\ s\ \alpha\ 3\ \omega\ 3\ uZZ\Delta\ H\Delta\sim z\ Z u$
 $\theta x\kappa\ \vartheta\ 3\ 9\ \pi\varphi\chi\ X\ u\ \sigma\ \pi\varphi\ \xi\ 2\ \chi\ 1\ 7\ 3\ \tau\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ 8\ 6\ \xi\ 2\ 7\ 4\ 3\ 6\ 8\ 8\ \varphi\ 6\ 3\ 9\ u\varphi$
 $\varrho\chi\sigma\ 4\ 0\ \xi\ 2\ 8\ 7\ u\ X\ \text{H}\ \Pi\Phi\ \Delta\ \xi\ 2\ \rho\ \vartheta\ \varphi\ \text{H}\text{T}\ 0\ 3\ 0\ \xi\ 0\ \Sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ \xi\ 2\ \rho$
 $\Pi\ 2\ 8\ 6\ 3\ 0\ 7\ \tau\ 6\ 3\ 1\ \varrho\chi\sigma\ T\chi\ \rho\tau\ \xi\ 2\ \rho\ 3\ 8\ \varphi\sigma\ \Xi\ u\ 6\ \chi\tau\ 9\ 0\ 8\ 9\ 6\ \xi\ 0\ \xi\ 2\ \rho$
 $X\ \rho\ 9\ 7\ 8\ 6\ \chi\ \xi\ s\ s\ 3\ 9\ 6\ \pi\sigma\tau\ \alpha\sigma\ \rho\tau\ \epsilon\ \chi\ 2\ \xi\ 1\ \chi\ \Omega\ s\ \epsilon\ 3\ 7\ \chi\tau\ \Xi\ s\ \xi\ 2\ \rho$
 $s\ \xi\ 7\ 7\ \varrho\ \rho\ \theta\ \epsilon\ \kappa\ s\ \zeta\ \phi\ \Omega\ s\ \vartheta\ P\ \phi\ \varphi\ 0\ 0\ \chi\ \varphi\sigma\ 7\ s\ \alpha\ 3\ \omega\ 3\ uZZ\Delta\ H$
 $E\Delta\sim x\omega Au$
 $\theta xA\kappa\ \vartheta\ \varphi\chi\ \chi\ u\ T\ \Psi\ \xi\ 2\ \rho\ \Pi\varphi\ \xi\ 2\ 8\ 3\ 2\ \Psi\ \varphi\ u\ \varphi\ 0\ \chi\ 1\ \xi\ 6\ 3\ 4\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ 2$
 $\pi\ 9\ 2\ 8\ 6\ 3\ 0\ 7\ \tau\ 6\ 3\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ \tau\ 6\ 3\ 1\ 1\ \sigma\ 0\ \xi\ 2\ \rho\ \theta\psi\kappa\ s$
 $\vartheta\ \xi\ 8\ 9\ 6\ \sigma\ s\ xZZx\ \Theta\ z\ \Gamma\ \Delta\ s\ \Delta\ Z\Delta\sim\Delta ZBu$
 $\theta xB\kappa\ s\ \xi\ 7\ 7\ \varrho\ \vartheta\ s\ T\chi\ \varphi\sigma\ T\ \epsilon\ s\ \xi\ 2\ \rho\ \Phi\ \xi\ 0\ \pi\ 3\ 1\ 0\ \sigma\ \varphi\ \Xi\ u\ \epsilon\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma$
 $4\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ 2\ 2\ \xi\ 2\ \rho\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ \chi\ 2\ \xi\ \alpha\ \sigma\ \xi\ 7\ \varrho\chi\sigma\ \tau\chi\ \rho\ \theta\psi\kappa\ s$
 $T\ 0\ 3\ 0\ \xi\ 0\ \text{O}\chi\ 1\ u\sigma\ \pi\sigma\ 1\ \chi\tau\ \xi\ 0\ \Pi\pi\sigma\ s\ xZZ\omega\ \Theta\alpha\ H\Delta\Delta\sim\Gamma E u$
 $\theta x\Gamma\kappa\ \epsilon\ \chi\ 2\ 3\ \rho\ \xi\ \alpha\ s\ \Omega\chi\ 1\ 9\ 6\ \xi\ \epsilon\ s\ \xi\ 2\ \rho\ \vartheta\ \xi\ \rho\ \Xi\ u\ \varphi\ \varphi\ 3\ 8\ 3\ 7\ s\ 2\ 8\ \varphi\ \xi\ 8\ \sigma\tau$
 $\xi\ 7\ \rho\ 3\ 1\ \chi\ \xi\ 2\ 8\ 7\ 3\ 6\ 9\ 0\ \pi\sigma\ 3\ \tau\ \Pi\Phi\ \Delta\ \xi\ 2\ \rho\ \Pi\ \varphi\ \gamma\ \chi\ 2\ 7\ 3\ \chi\ 1\ \xi\ s\ \sigma\ \xi\ 2\ \rho$
 $\Pi\Phi\ \Delta\ \sigma\ 1\ \chi\ 8\ \sigma\ \rho\ 8\ 3\ 8\ \varphi\ \xi\ 8\ 1\ 3\ 7\ 4\ \varphi\sigma\ \sigma\ \tau\ 6\ 3\ 1\ 4\ \xi\ \rho\ 3\ \tau\chi\ \rho\tau\ \theta\psi\kappa\ s$
 $\Psi\ 9\ 6\ 2\ \xi\ 0\ 3\ \tau\ T\sigma\ 4\ \varphi\ 7\ \chi\tau\ \xi\ 0\ \varrho\ \sigma\ 1\ \sigma\ \xi\ 2\ \sigma\ \pi\varphi\ s\ xZZ\Gamma\ \Theta\alpha\ x\ u\ H$
 $y\chi\ u\ Z\chi\sim y\chi\ u\ Z\Delta u$

作者简介H

黄 耀,男,*xZBB* 年生,教授,获美国莱斯大学博士学位。在国内外刊物发表论文*A*₀₀余篇,获省、部级科技成果奖*z*项。目前从事农田温室气体排放、环境生态模型的研究。

$\Pi\ 2\ 8\ 6\ \chi\ 0\ 9\ s\ \chi\ 3\ 2\ 3\ \tau\ \varrho\chi\sigma\ \text{O}\chi\ 3\ 1\ \xi\ 7\ 7\ \varphi\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ 2\ 2\ 8\ 3\ \Pi\Phi\ \Delta\ \Sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ \tau\ 6\ 3\ 1\ X\ \rho\ \chi\ \omega\ \xi\ s\ \sigma\ \rho\ \varphi\ \xi\ \rho\ 3\ s\ 3\ \chi\ 7\ u\ \Phi\ \beta\ \Xi\ \vartheta\ T\ \zeta\ \xi\ 3\ \omega\ \Pi\ 0\ 0\ \sigma\ u\sigma\ 3\ \tau\ \varrho\ \sigma$
 $7\ 3\ 9\ 6\ \pi\sigma\tau\ \xi\ 2\ \rho\ \Sigma\ 2\ 0\ \chi\ 3\ 2\ 1\ \sigma\ 2\ 8\ \xi\ 0\ s\ \pi\chi\sigma\ 2\ \pi\sigma\tau\ s\ \vartheta\ \xi\ 2\ \varphi\chi\ u\ \Xi\ u\ 6\ \chi\tau\ 9\ 0\ 8\ 9\ 6\ \xi\ 0\ \beta\ 2\ \chi\ \sigma\ 6\ 7\ \chi\ 3\ s\ \vartheta\ \xi\ 2\ \varphi\chi\ u\ s\ \Psi\ \xi\ 2\ u\ 7\ 9\ \gamma\alpha\alpha\alpha\ ZB\ s\ \Pi\varphi\chi\ \xi\ \rho\ \Theta\ 3\ 2\ \xi\ 0\ \rho\ \vartheta\ u\ s\ \xi\ 7\ 7$
 $\xi\ 2\ \rho\ T\ \phi\ \xi\ 2\ \omega\ \epsilon\ u\ T\chi\ \varphi\sigma\ \omega\ P\sigma\ 1\ \xi\ 6\ 8\ 1\ \sigma\ 2\ 8\ 3\ \tau\ \Sigma\ \pi\ 3\ 0\ 3\ \rho\ 3\ \xi\ 2\ \rho\ \Sigma\ 0\ 3\ 0\ 9\ 8\ \chi\ 2\ \xi\ 6\ 3\ \text{O}\chi\ 0\ 3\ u\ s\ \varrho\chi\sigma\ \beta\ 2\ \chi\ \sigma\ 6\ 7\ \chi\ 3\ s\ \Phi\ 3\ 9\ 7\ 8\ 3\ 2\ s\ \alpha\ \epsilon\ \Delta\chi\alpha\ B\longrightarrow\text{xEZy}\ s$
 $\beta\ s\ \Xi\ \rho\ s\ \Xi\ u\ 6\ 3\ \rho\sigma\ 2\ 0\ \chi\ 3\ 2\ 1\ \sigma\ 2\ 8\ \xi\ 0\ \varphi\ 6\ 3\ 8\ \sigma\pi\chi\ 2\ s\ xZZZ\ \Theta\ E\ \rho\ A\ p\ H\ B\ u\sim x\ B A$
 $\Xi\ u\ 7\ 0\ 6\ \xi\ \pi\ \text{H}\ \epsilon\ \sigma\ \xi\ 7\ 9\ 6\ \sigma\ 1\ \sigma\ 2\ 8\ 7\ \tau\ 3\ \pi\ 9\ 7\ \sigma\ \rho\ 3\ 2\ 8\ \varphi\sigma\ \pi\ 2\ 8\ 6\ \chi\ 0\ 9\ s\ \chi\ 3\ 2\ 3\ \tau\ \varrho\chi\sigma\ 4\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ \chi\ \chi\ 8\ 3\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ 1\ \sigma\ \sigma\ 1\ \xi\ \rho\ \sigma\ \chi\ 2\ 8\ \varphi\sigma\ \sigma$
 $\sigma\ 2\ 4\ \sigma\ \chi\ 1\ \sigma\ 2\ 8\ 7\ \pi\ 3\ 2\ \rho\ \pi\sigma\ \sigma\ \rho\ \chi\ 2\ \alpha\ \sigma\ 2\ \xi\ 7\ \tau\ 6\ 3\ 3\ \rho\ \sigma\ \rho\ 4\ \xi\ \rho\ 3\ s\ 7\ 3\ \chi\ 7\ \rho\ 9\ 6\chi\ u\ xZZA\ \xi\ 2\ \rho\ xZZB\ u\ 6\ 3\ 1\ \chi\ u\ 1\ \sigma\ \xi\ 7\ 3\ 2\ 7\ u\ \Xi\ 8\ 3\ 8\ \xi\ 0\ 3\ \tau\ \tau\chi\ \sigma\ \varrho\chi\sigma\ \pi\ 9\ 0\ 8\ \chi\ \xi\ 6\ 7$
 $\sigma\ 4\ 6\ \sigma\tau\ \sigma\ 2\ 8\ \chi\ 2\ u\ 8\ 1\ 3\ \rho\chi\ 8\chi\ \pi\ \text{u}\ 6\ 3\ 9\ 4\ 7\ \chi\ 1\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ 1\ \sigma\ \sigma\ \chi\ 2\ 0\ 3\ 0\ 0\ \sigma\ \rho\ u\ \phi\ 0\ \sigma\ \xi\ x\omega\longrightarrow\sigma\sigma\omega\ 4\ \sigma\chi\ \rho\ \xi\ \tau\ \tau\ \sigma\ 6\ 4\ \sigma\ 1\ \xi\ 2\ \sigma\ 2\ 8\ \tau\ 6\ 3\ 3\ \rho\chi\ \text{u}\ s$
 $8\ 3\ 8\ \xi\ 0\ 1\ \sigma\ \xi\ 7\ 3\ 2\ 7\ \xi\ 0\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ 1\ \xi\ 7\ 4\ 3\ 7\ \chi\ \chi\ \sigma\ 3\ \pi\ 1\ 6\ 6\ \sigma\ \xi\ s\ \sigma\ \rho\ 1\ \chi\ \varphi\ \sigma\ \varrho\chi\sigma\ \xi\ 0\ 3\ 0\ 0\ \sigma\ u\ 6\ 3\ 9\ 2\ \rho\ \sigma\chi\ 1\ \xi\ 7\ 7\ \rho\ 6\ 3\ K\omega\ E\text{A}B\ s\ 2\ K\ x\ x\ \rho\ u\ \Xi\ 0\ \sigma\ 6\ 3$
 $7\ 8\ 6\ 3\ 2\ u\ \rho\ \sigma\ 4\ \sigma\ 2\ \rho\ \sigma\ 2\ \pi\sigma\ 3\ \tau\ \rho\ \xi\ \chi\ 3\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ 3\ 2\ \xi\ 0\ 3\ 0\ 0\ \sigma\ u\ 6\ 3\ 9\ 2\ \rho\ \sigma\ u\ \sigma\ \xi\ s\ \chi\ 2\ \sigma\ \sigma\chi\ 1\ \xi\ 7\ 7\ \rho\ 6\ 3\ K\omega\ E\text{E}\Delta\ s\ 2\ K\ Z\ \rho\ \tau\ \xi\ 3\ \rho\ 3\ 2\ 6\ 3\ 3\ 8\ \sigma\chi\ 1\ \xi\ 7\ 7$
 $\rho\ 6\ 3\ K\omega\ E\text{E}\Gamma\ s\ 2\ K\ Z\ \rho\ 1\ \xi\ 7\ 3\ 3\ 0\ 7\ \sigma\ 0\ \sigma\ \rho\ u\ \Pi\ \xi\ 0\ \pi\ 0\ \xi\ s\ \chi\ 2\ \tau\ 6\ 3\ 1\ 8\ \varphi\sigma\ \sigma\ \rho\ \sigma\ \sigma\ \sigma\ 3\ 4\ 1\ \sigma\ 2\ 8\ \xi\ 0\ 4\ \sigma\chi\ \rho\tau\ \omega\ \sigma\ u\ \sigma\ \xi\ s\ \chi\ \sigma\ s\ 6\ \sigma\ 1\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ \chi\ \sigma\ \xi\ 2\ \rho$
 $\varrho\chi\ 1\ \sigma\ 2\ \chi\ u\ \rho\ 3\ \tau\ \varrho\chi\sigma\ 4\ 0\ \xi\ 2\ 8\ \chi\ \rho\chi\tau\ \xi\ s\ \sigma\ 8\ \varphi\ \xi\ 3\ 1\ 3\ 6\ \sigma\ 8\ \varphi\ \xi\ 2\ \Delta B\ \%\ 3\ \tau\ 8\ 3\ 8\ \xi\ 0\ 1\ \sigma\ \xi\ 7\ 3\ 2\ \xi\ 0\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ 1\ \xi\ 7\ \sigma\ 1\ \chi\ 8\ \sigma\ \rho\ \rho\ 9\ 6\chi\ u\ 8\ \varphi\sigma\ \varrho\ \xi\ 7\ 8\ B\longrightarrow\sigma\sigma\omega$
 $4\ \sigma\chi\ \rho\ \chi\ 2\ \pi\ 3\ 2\ \pi\sigma\ 6\ 8\ 1\ \chi\ \varphi\ \sigma\ 6\ 4\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ \chi\ \sigma\ \xi\ 2\ \rho\ \varrho\chi\ 1\ \sigma\ 2\ \chi\ 2\ u\ 7\ 8\ \xi\ u\ \sigma\tau\ s\ 1\ \varphi\ \xi\ \sigma\ \varrho\chi\sigma\ \sigma\chi\ 1\ \xi\ 7\ 7\ 4\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ \chi\ 2\ \rho\ 9\ 6\chi\ u\ 8\ \varphi\sigma\ \tau\ \xi\ 1\ \sigma\ 4\ \sigma\chi\ \rho\ \xi\ 1\ 3\ 9\ 2\ 8\ \sigma\ \rho\ 8\ 3$
 $\xi\ 1\ 4\ 6\ 3\ 2\ \chi\ 1\ \xi\ s\ \sigma\ 3\ B\omega\ \%\ 3\ \tau\ 8\ \varphi\sigma\ 1\ \sigma\ \xi\ 7\ 3\ 2\ \xi\ 0\ 8\ 3\ \xi\ s\ 7\ 9\ u\ u\ \sigma\tau\ s\ \chi\ 2\ u\ 8\ \varphi\ \xi\ 8\ \varphi\sigma\ 7\ 9\ \chi\ \xi\ 0\ 8\ \sigma\ 8\chi\ 1\ \sigma\ \tau\ 6\ 6\ \pi\ 2\ 8\ 6\ 3\ 0\ 0\ \chi\ 2\ u\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ \tau\ 6\ 3\ 1\ \varrho\chi\sigma$
 $4\ \xi\ \rho\ \rho\chi\tau\ 1\ 3\ 9\ 0\ \rho\ 0\ \sigma\ \chi\ 2\ 8\ \varphi\sigma\ 4\ 0\ \xi\ 2\ 8\ \rho\ \sigma\ \sigma\ 3\ 4\ 1\ \sigma\ 2\ 8\ \xi\ 0\ 4\ \sigma\chi\ \rho\tau\ 3\ \tau\ \sigma\ 4\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ \chi\ \sigma\ \xi\ 2\ \rho\ \varrho\chi\ 1\ \sigma\ 2\ \chi\ 2\ u\ u$
 $\Omega\omega\ s\ 1\ 3\ 6\ \rho\tau\ H\ u\ \sigma\sigma\ 2\ \varphi\ 3\ 9\ 7\ \sigma\ u\ \xi\ 7\ \sigma\ s\ 1\ \sigma\ \varphi\ \xi\ 2\ \sigma\ \sigma\ 1\ \chi\ 1\ \chi\ 2\ 7\ s\ \varrho\chi\sigma\ 4\ \xi\ \rho\ \rho\chi\tau\ s\ \varrho\chi\sigma\ \sigma\chi\ 1\ \xi\ 7\ 7\ 4\ 6\ 3\ \rho\ \pi\chi\ \chi\ 2$