

# 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响\*

杨兰芳<sup>1,2</sup> 蔡祖聪<sup>1</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 湖北大学资源与环境学院, 武汉 430062)

**摘要** 运用盆栽试验研究了玉米生长和施氮水平(N 150 mg kg<sup>-1</sup>和 300 mg kg<sup>-1</sup>)对土壤呼吸的影响。结果表明种植玉米的土壤呼吸速率(C)的变化范围为 19.6~762.1 mg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>, 而裸土为 4.3~36 mg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>。在玉米生长的条件下, 苗期土壤呼吸最低, 73%的土壤呼吸分配在拔节孕穗期和成熟期。玉米生长中各阶段根际呼吸对土壤呼吸的贡献在 58%~98%, 苗期最小。施氮对裸土呼吸速率无显著影响; 在玉米生长的条件下, 施用高氮的土壤呼吸比施用低氮高 28%, 且两种施氮水平下土壤呼吸的差异主要发生在生长中后期。玉米生长的条件下土壤呼吸与温度的相关性不显著, 而裸土下土壤呼吸速率与气温、表土温度、5 cm 土壤温度均呈极显著的相关性; 裸土施用高氮下的土壤呼吸与温度的相关性大于低氮。总之, 玉米生长和土壤施氮不仅影响土壤呼吸速率和呼吸量, 也影响土壤呼吸在各生长阶段的分配, 还影响到土壤呼吸与温度的关系。

**关键词** 玉米生长; 土壤呼吸; 生长阶段; 土壤施氮; 根际呼吸; 温度

**中图分类号** S152.6 **文献标识码** A

土壤是主要的陆地生态系统碳库, 全球土壤中所含的碳是大气碳的两倍, 是植物碳的 3 倍<sup>[1]</sup>。土壤呼吸是陆地植物固定 CO<sub>2</sub>后又释放 CO<sub>2</sub>返回大气的主要途径, 土壤碳库在全球变化研究的地位日益突出, 而土壤呼吸作为土壤碳库碳消耗的一个重要过程不容忽视, 研究土壤呼吸有助于揭示土壤碳库动态机理<sup>[2]</sup>。土壤呼吸包括三个生物学过程, 即土壤微生物呼吸、植物根系呼吸和土壤动物呼吸, 和一个非生物学过程即含碳矿物质氧化与分解释放<sup>[3,4]</sup>。在一般情况下, 土壤动物呼吸和非生物过程释放的 CO<sub>2</sub>非常微小, 可以忽略不计<sup>[4]</sup>。土壤呼吸也可分为根系呼吸、微生物分解来源于植物有机碳的呼吸和微生物分解原土壤有机质的呼吸, 通常将根系呼吸和微生物分解植物来源有机物质的呼吸称为根际呼吸<sup>[5,6]</sup>。利用大豆、向日葵、高粱和苋菜进行的盆栽试验表明根际呼吸占土壤总呼吸的 61%~82%, 因植物类型而异<sup>[5]</sup>。植物的不同生长时期根际呼吸也不一样, 用<sup>13</sup>C 研究表明, 玉米根际呼吸 C 从生长初期的 19.4 mg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>, 增加到生长

中期的 208.3 mg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>, 然后又逐渐下降到生长后期的 29.5 mg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup><sup>[6]</sup>。由此可见, 在生态系统中, 土壤呼吸主要受植物类型和植物生长的影响。施肥是提高植物产量的关键措施之一, 施肥必然影响植物生长, 但是土壤施肥与土壤呼吸的关系方面的报道尚比较少见。本试验测定了盆栽试验条件下玉米生长中两种施氮水平下土壤呼吸速率的动态变化和总呼吸量, 以研究玉米生长中土壤呼吸变化规律和氮肥的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试土壤为淋溶土, 采自南京林业大学试验场, 土壤采回后风干, 剔出植物残体, 过 5 mm 筛备用。土壤 pH(水提, 2.5:1)为 5.80, 土壤粘粒(< 2 μm)、粉粒(2~ 20 μm)和砂粒(20~ 2000 μm)含量分别为 213、462 和 325 g kg<sup>-1</sup>。土壤有机碳含量为 4.9 g kg<sup>-1</sup>, 全氮含量为 0.6 g kg<sup>-1</sup>(为了减少人为活动

\* 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-05)、国家杰出青年基金项目(40125004)、国家重点基础研究发展规划项目(G1999011805)资助

作者简介: 杨兰芳(1964~), 男, 在读博士生, 主要研究方向为土壤温室气体排放及碳循环。E-mail: lfyang@issas.ac.cn; lfyang2003@hotmail.com

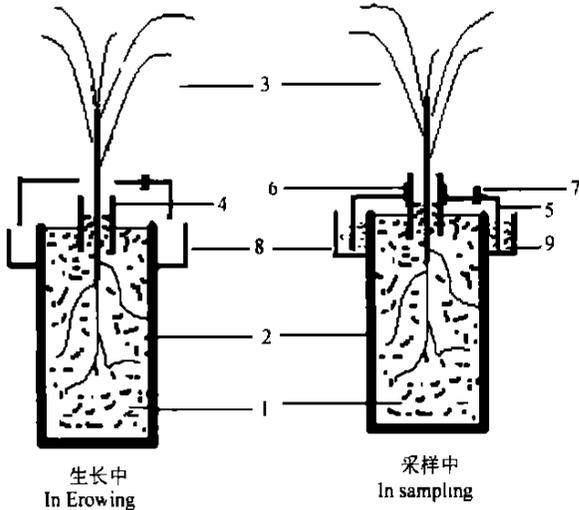
收稿日期: 2004-01-07; 收到修改稿日期: 2004-03-24

带入的含碳物质的影响,土壤采自剖面 20 cm 以下,所以土壤有机碳含量低)。

供试植物为玉米 (*Zea mays* L.), 品种为掖单 14 号, 购于南京市锁金村中江种业公司。

## 1.2 方法

试验盆钵: 试验盆钵用 PVC 材料, 主体为圆柱形, 盆高 20 cm, 内径 15 cm。盆外缘有水槽, 水槽外形为正方形, 边长为 25 cm, 水槽高 5 cm, 采样时注水密封。盆口中央装有供植物生长的 PVC 隔离管, 管内径 2.5 cm, 长 6 cm, 其中露出盆口 2.5 cm。每个盆钵配有一个气体采样箱, 采样箱为长 20.5 cm、宽 20.5 cm、高 6 cm, 下端开口的长方体, 采样箱盖子上装有供注射器采样用的硅橡胶塞孔, 正中央有直径 3.2 cm 的圆孔, 孔的大小正好能套进 PVC 隔离管。盆钵结构及采样装置见图 1。



1. 土壤 Soil; 2. PVC 盆钵 PVC pot; 3. 玉米植株 Maize plant;  
4. PVC 管 PVC tube; 5. 采样箱 Chamber; 6. 密封用硅胶  
Silicone gel to seal the joint; 7. 采样塞 Septum used for gas sampling;  
8. 水槽 Water trough; 9. 水 Water

图 1 试验盆钵和采样装置图

Fig 1 Scheme of the experimental pot for maize growth and sampling for soil respiration measurement

盆栽试验: 设置两种施氮水平, 以裸土为对照, 共 4 个处理, 即裸土低氮 ( $N\ 150\ mg\ kg^{-1}$ )、裸土高氮 ( $N\ 300\ mg\ kg^{-1}$ )、种玉米低氮和种玉米高氮, 每处理重复 3 次。每盆装过 5 mm 筛的风干土 4.0 kg, N、P、K 肥料作为基肥一次性施入, 各处理 P、K 用量相同, 分别为  $P\ 75\ mg\ kg^{-1}$  和  $K\ 150\ mg\ kg^{-1}$ 。分别以  $(NH_4)_2SO_4$ 、 $KH_2PO_4$  和  $K_2SO_4$  为肥源。于 2003 年 4 月 30 日播种, 每盆播种玉米种子 2 颗, 种子播于隔离

管中 2~3 cm 深的土层中。5 月 5 日出苗, 出苗后各盆保留长势一致的苗 1 株, 以便其正常生长。通过从盆钵底部插入到土壤中的陶土管与水槽连接, 补充蒸发或蒸腾损失的土壤水分。通过调节水槽中水位, 保持土壤水分基本一致。

土壤呼吸样品采集: 从出苗后第四天开始采样, 每周采样 2 次, 直到玉米种子完全成熟为止。每次采样时间在 16:00~18:00 之间。本试验用静态箱法采集气体样品, 将盆钵外缘的水槽加入 250 ml 水, 测定气温、表土温度和 5 cm 土壤温度后, 将采样箱提起, 用扇子煽动约 20 s, 使土壤表面气体与空气充分交换, 然后将采样箱放入水槽中, 使采样箱下缘四周淹没在水里, 用 704 硅胶密封采样箱与 PVC 隔离管的交接处, 按 0、10、20 min 的时间间隔用注射器通过针头从采样箱上的硅橡胶塞孔采 3 次气体, 每次采 20~23 ml 气体注入 18 ml 的已经抽成真空的玻璃瓶中。采完样后刮去硅胶, 将采样箱向上提起, 约 45° 交错置于水槽口上, 以利于正常气体交换。

样品分析: 土壤碳、氮含量均用美国 PE 公司生产的 PIE 2400- $\text{C}$  碳氢氮氧硫分析仪测定, 质地用德国贝克曼公司生产的 LS-230 激光粒度仪测定, 土壤 pH 用去  $CO_2$  的水浸提, 水土比 2.5:1, 精密酸度计测定。

$CO_2$  的测定: 将采样瓶带回室内, 用气相色谱法 (Shimadzu GG-14B), 热传导检测器法测定  $CO_2$  浓度, 80/100 目的 Chromosorb 102 柱。炉温、注射口温和检测器温度分别为 60、100 和 60 °C。载气为氢气, 流速为  $80\ ml\ min^{-1}$ 。根据气体浓度与时间的线性关系计算土壤  $CO_2$  的排放速率。

## 2 结果

### 2.1 玉米全生育期中土壤呼吸的变化规律

从图 1 可见, 玉米出苗后的前 10 d 内, 种植玉米的土壤呼吸速率与裸土的土壤呼吸速率没有什么差别; 出苗 10 d 以后, 种植玉米的土壤呼吸开始高于裸土的土壤呼吸; 17 d 以后, 种植玉米的土壤呼吸速率随生长时间延长而急剧增加, 分别在出苗后 35、46、63、70、77 d 出现峰值, 其中最大峰值出现在出苗后 63 d; 从 77 d 开始, 种植玉米土壤的土壤呼吸速率随时间延长而下降, 直到玉米收获。种植玉米的土壤呼吸速率 C 变化范围在高氮条件下为  $25.2\sim 762.1\ mg\ m^{-2}\ h^{-1}$ , 低氮下为  $19.6\sim 560.6\ mg\ m^{-2}\ h^{-1}$ , 裸土为  $4.3\sim 36\ mg\ m^{-2}\ h^{-1}$ 。

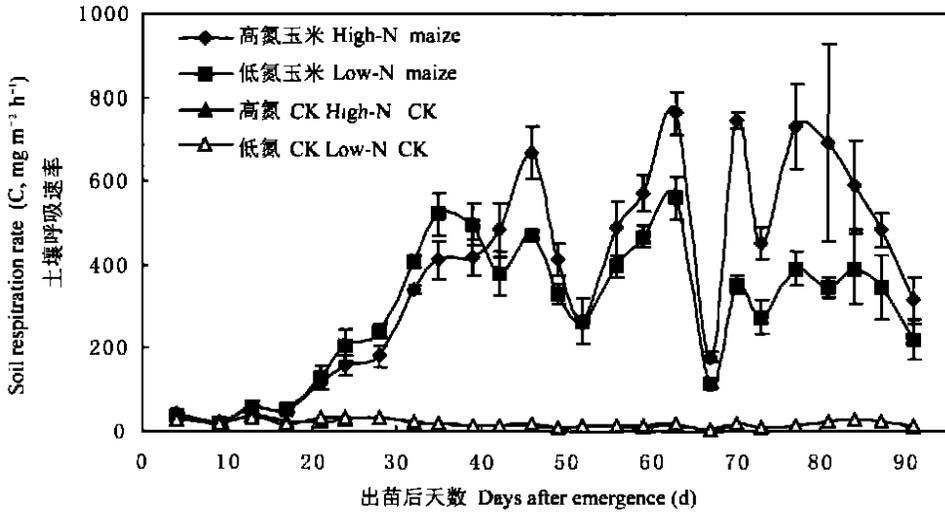


图2 玉米生长期间土壤呼吸速率的变化规律

Fig. 2 Seasonal variation of soil respiration rate during the maize growth period

## 2.2 玉米各生长阶段的土壤呼吸速率与呼吸量

将玉米的整个生育期分为出苗期、拔节孕穗期、抽穗开花期和成熟期4个生长阶段<sup>[7]</sup>,各生长阶段的呼吸速率和呼吸量见表1和表2。

表1表明,在各个生长阶段,种植玉米的土壤呼

吸速率均显著高于裸土的呼吸速率。苗期的土壤呼吸速率显著低于其他时期。在高氮下,从出苗到成熟,土壤呼吸速率依次增加;在低氮下,抽穗开花期最高,成熟期下降。相应裸土的土壤呼吸速率先随时间进展而下降,到后期又有所回升。

表1 玉米各生长阶段的土壤呼吸速率

Table 1 Soil respiration rate at each growing stage(C, mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	生长阶段 Growing stage				全生育期 Whole
	苗期 Seedling	拔节孕穗 Elongating-booting	抽穗开花 Earing-flowering	成熟 Ripening	
高氮 High N	57.6a	385.3a	537.3a	578.5a	366.9a
低氮 Low N	61.3a	377.6a	386.2b	338.3b	286.5b
高氮裸土 High-N CK	24.0b	18.4b	12.1c	18.5c	18.9c
低氮裸土 Low-N CK	25.2b	19.4b	13.6c	19.5c	20.1c

表2 玉米各生长阶段的土壤呼吸量

Table 2 Accumulative soil respiration at each growing stage(C, g pot<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	生长阶段 Growing stage				全生育期总量 Total
	苗期 Seedling	拔节孕穗 Elongating-booting	抽穗开花 Earing-flowering	成熟 Ripening	
高氮 High N	0.56a	5.00a	3.05a	4.93a	13.54a
低氮 Low N	0.60a	4.90a	2.20b	2.88b	10.58b
高氮裸土 High-N CK	0.23b	0.24b	0.07c	0.16c	0.70c
低氮裸土 Low-N CK	0.25b	0.25b	0.08c	0.17c	0.74c

表2表明,各生长阶段的土壤呼吸总量也是玉米土壤高于裸土,在种植玉米下,土壤施用高氮处理

时,土壤呼吸量表现为苗期最低,拔节孕穗期最高,但与成熟期相差不大;低氮条件下,苗期最低,拔节

孕穗期最高。

### 2.3 土壤呼吸在玉米各生长阶段的分配

各生长阶段的土壤呼吸占全生育期土壤呼吸的比例见表3。从表3可见, 苗期土壤呼吸所占比例最低, 拔节孕穗期最高。种植玉米的土壤呼吸在各生长阶段的分配方式与裸土不同, 种植玉米的土壤

表3 玉米土壤呼吸在各生长阶段的分配

Table 3 Distribution of soil respiration at each growing stage(%)

处理 Treatment	苗期 Seedling	拔节孕穗 Elongating-booting	抽穗开花 Earing-flowering	成熟 Ripening
高氮 High N	4. 2a	37. 0a	22. 5a	36. 3a
低氮 Low N	5. 6a	46. 4b	20. 8b	27. 2b
高氮裸土 High-N CK	33. 4b	34. 0c	9. 8c	22. 7c
低氮裸土 Low-N CK	33. 2b	34. 0c	10. 4c	22. 4c

表4 玉米各生长阶段根际呼吸占土壤呼吸的比例

Table 4 Contribution of rhizosphere respiration to soil respiration(%)

处理 Treatment	生长阶段 Growing stage				全生育期 Whole
	苗期 Seedling	拔节孕穗 Elongating-booting	抽穗开花 Earing-flowering	成熟 Ripening	
高氮 High N	57. 9a	95. 2a	97. 7a	96. 8a	94. 8a
低氮 Low N	58. 2a	94. 9a	96. 5b	94. 2b	93. 0b

### 2.5 施氮对土壤呼吸的影响

在裸土下, 施氮对土壤呼吸速率、土壤呼吸量和土壤呼吸在各生长阶段的分配均没有显著影响(表1~表3)。在种植玉米条件下, 高氮和低氮在苗期和拔节孕穗期的土壤呼吸速率、土壤呼吸量没有显著差别, 而在抽穗开花期和成熟期, 高氮土壤呼吸速率和土壤呼吸量显著高于低氮(表1, 表2)。从图1还可以看出, 在出苗后17~42 d, 低氮处理的土壤呼吸速率大于高氮处理, 此后则是高氮大于低氮。不同施氮量处理的土壤呼吸在各生长阶段的分配也不相同, 高氮处理的土壤呼吸主要分配在拔节孕穗和成熟期, 而低氮处理的土壤呼吸主要分配在拔节孕

呼吸主要分配在拔节孕穗期和成熟期, 它们占全生育期土壤呼吸的70%以上, 而在玉米的出苗和拔节孕穗期, 则是相应裸土土壤呼吸分配最多的时期, 它们占总土壤呼吸的67%。

### 2.4 玉米根际呼吸占土壤呼吸的比例

根际呼吸是土壤呼吸中来源于植物光合产物的部分, 在忽略植物生长对土壤有机质分解的激发效应下, 种植物的土壤呼吸减去不种植物的土壤呼吸就可以看作是植物根际呼吸。根际呼吸占土壤呼吸的比例可以反应出植物光合产物在土壤呼吸中的作用。表4表明, 在玉米生长期间, 根际呼吸占土壤呼吸的比例在58%~98%之间, 苗期的比例最低, 不到60%, 其他时间都在90%以上。整个生长期平均, 根际呼吸的比例达93%~95%。

穗期, 表现为拔节孕穗期>成熟期>抽穗开花期>苗期, 其中拔节孕穗期的土壤呼吸几乎占了全生育期土壤呼吸的1/2(表3)。高氮处理全生育期的平均土壤呼吸速率和呼吸总量显著大于低氮处理。根际呼吸占土壤呼吸的比例除苗期外, 其余都呈高氮大于低氮的趋势。

### 2.6 玉米生长和土壤施氮对温度与土壤呼吸关系的影响

用相关系数表示土壤呼吸与温度相关性的程度,  $Q_{10}$ 是指温度增加10℃时, 土壤呼吸增加的倍数, 用它可以表示温度对土壤呼吸的效应。由表5可知, 裸土土壤呼吸与温度的指数相关系数和  $Q_{10}$

表5 各处理的土壤呼吸与温度的指数相关系数( $r$ )和  $Q_{10}$ 值

Table 5 Correlation coefficient ( $r$ ) and  $Q_{10}$  between soil respiration rate and temperature of each treatment

温度 Temperature	高氮玉米 High N to maize		低氮玉米 Low N to maize		高氮裸土 High N to bare soil		低氮裸土 Low N to bare soil	
	$r$	$Q_{10}$	$r$	$Q_{10}$	$r$	$Q_{10}$	$r$	$Q_{10}$
空气 Air	0. 184	1. 24	0. 237	1. 31	0. 649**	3. 29	0. 592**	2. 73
表土 Surface soil	0. 241	1. 37	0. 242	1. 34	0. 698***	3. 40	0. 624**	3. 19
5 cm	0. 279	1. 38	0. 333	1. 45	0. 655**	2. 76	0. 582**	2. 52

\*\*  $p < 0. 01$  \*\*\*  $p < 0. 001$

显著大于玉米生长下的相关系数和  $Q_{10}$ 。玉米生长下, 土壤呼吸速率与温度之间没有显著的相关性, 相关系数和  $Q_{10}$  以 5 cm 土壤处最高, 并呈低氮 > 高氮的趋势, 但差异不显著。在裸土下, 土壤呼吸速率与气温、表土温度、5 cm 土壤温度均呈极显著的指数相关, 相关系数和  $Q_{10}$  呈表土最高, 高氮明显大于低氮。

## 3 讨论

### 3.1 玉米生长与土壤呼吸的关系

从玉米生长期间的土壤呼吸速率变化中可以看出, 在植物—土壤系统中, 土壤呼吸速率与玉米生长发育相一致, 土壤呼吸速率先随玉米生长时间延长而增加, 到一定时期达到最大, 然后随生长时间延长而下降。这说明在玉米生长期间, 土壤呼吸的物质基础来源于玉米的同化产物, 当玉米生长旺盛时, 地下的呼吸作用也旺盛。因此在玉米生长期间, 土壤呼吸也可以反应玉米的生长状况。Ben-Asher 等的研究发现土壤呼吸与根系的主要特性之间具有满意的相关性, 表明土壤呼吸能够提供根系活性方面的重要信息<sup>[8]</sup>。植物生长所需要的矿质营养和水分是靠根系从土壤中吸收的, 而根系吸收养分和水分则需要消耗代谢产物, 这部分能量则由植物地上部分的同化产物提供。所以植物生长与土壤呼吸是相互协调和统一的。

土壤呼吸受温度影响, 陈全胜等<sup>[9]</sup>对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的研究表明, 土壤呼吸与气温、地表温度、5 cm、10 cm、15 cm、25 cm 的土壤温度均呈极显著的指数相关性, Alvarez<sup>[10]</sup>的结果表明土壤原位  $CO_2$  排放与气温呈指数相关, Buchmann<sup>[11]</sup>也发现指数方程能最好地描述土壤呼吸和有机表层土壤温度的关系。本试验中, 裸土下的土壤呼吸速率与气温、表土温度、5 cm 土壤温度均呈极显著的指数相关, 与上述研究者的结果一致。玉米生长下的土壤呼吸与 3 种温度的相关性均不显著, 这说明在玉米生长下, 土壤呼吸与温度的关系不同于裸土, 表明植物生长显著地改变了土壤呼吸速率与温度的关系。裸土下的  $Q_{10}$  在 2.5~3.4, 显著高于玉米生长下的  $Q_{10}$  (1.2~1.5), 这说明玉米生长不仅削弱了土壤呼吸速率与温度的相关关系, 也减弱了温度对土壤呼吸的效应。测定草地土壤呼吸速率时, 全部割去测定面积内的植物<sup>[9]</sup>, 很可能掩盖了植物对土壤呼吸速率与温度关系的影响。

### 3.2 根际呼吸的比例

根际呼吸是有植物生长的生态系统中土壤呼吸的主要部分, 相当大的一部分光合产物通过根际呼吸损失掉<sup>[6]</sup>, 根际呼吸可以占同化碳的 10%~40%<sup>[12]</sup>, 文献报道的禾谷类和草类的根际呼吸占土壤呼吸的比例变化在 51% 到 89% 之间<sup>[13]</sup>。在本试验下, 玉米全生育期中, 根际呼吸在土壤呼吸中占 93%~95%, 在不同生长阶段中, 除了苗期不到 60% 外, 其余时期均在 94% 以上(表 4)。本试验根际呼吸对土壤呼吸贡献偏大, 主要有四个方面原因。一是因为忽略了激发效应, 植物生长对土壤有机质分解的激发效应有正有负。Fu 和 Cheng<sup>[14]</sup>研究表明, 大豆和向日葵对土壤有机质分解的激发效应为正效应, 分别达到 69.9% 和 38.5%, 而高粱和苋菜则是负效应, 分别为 9.2% 和 5.1%。二是因为土壤有机碳含量很低, 只为  $C\ 4.9\ g\ kg^{-1}$ 。土壤有机碳低导致基础土壤呼吸低, 它对总土壤呼吸的贡献也就低。Lohila 等<sup>[1]</sup>发现泥炭土的土壤呼吸是矿质土的 3 倍多, 原因是因为 20 cm 土壤中有机碳含量 ( $C\ 24\ g\ kg^{-1}$ ) 是相应矿质土的 4 倍多。三是因为植物类型, 同一土壤下, 不同植被类型的土壤呼吸速率不同, 如针叶林比阔叶林低 10%, 而草地比森林高 20%, 这证明植被类型显著影响土壤呼吸速率<sup>[15]</sup>, 高粱根际呼吸占土壤呼吸的 82%, 而苋菜占 67%<sup>[15]</sup>。四是本试验为盆栽试验, 土壤与作物根系的比例相对于大田可能较小, 因此, 土壤原有有机质的分解所占的比例相对较低。

### 3.3 施氮量对土壤呼吸的影响

本试验表明, 在裸土下, 施氮量对土壤呼吸无显著影响。在玉米生长下, 不同施氮量对土壤呼吸有显著影响, 说明不同氮素施用水平的土壤呼吸差异来自于植物。高氮的土壤呼吸速率和呼吸总量显著高于低氮, 在玉米全生育期中, 施用高氮的土壤呼吸比施用低氮的高 28%; 而且两种施氮水平下的土壤呼吸差异主要发生在中后期。在抽穗开花期高氮的土壤呼吸是低氮的 1.4 倍, 成熟期高氮的土壤呼吸是低氮的 1.7 倍, 在苗期和拔节孕穗期没有显著差异。另外不同施氮水平下土壤呼吸在各生长阶段的分配也不同。氮是植物的必需营养元素, 氮素不足, 植物的合成代谢受阻, 提供给根系的能量来源就会减少, 从而根际呼吸减少, 两种施氮水平下根际呼吸占土壤呼吸比例的差异也是在抽穗开花期和成熟期才有显著差异(表 4)。增加施氮量增加土壤呼吸速率可能原因有: (1) 氮是叶

绿素的成分,叶绿素是植物进行光合作用的基础,施氮增加叶绿素的形成,也就能增强光合作用,从而提供给根系和土壤的光合产物(有机碳)增加,而有机碳是土壤呼吸的物质和能量基础;(2)施氮促使植物生长<sup>[16]</sup>,一方面促使了根系生长,另一方面对养分和水分吸收增多,使根系呼吸增加;(3)施氮还可以提供给微生物有效氮,使微生物活性和数量增加,导致微生物呼吸增加。Warembourg<sup>[17]</sup>用<sup>14</sup>C标记黑麦草试验表明,肥沃土壤根系呼吸和分泌的新同化产物比贫瘠土壤高;Liljeroth<sup>[18]</sup>的小麦标记结果也表明高氮根土呼吸和土壤残留的<sup>14</sup>C比低氮高,土壤中含<sup>14</sup>C微生物量和根际微生物数量也是高氮比低氮高。Johansson<sup>[19]</sup>用<sup>14</sup>C标记大麦的试验结果是:在7周的实验里,前30 d,高氮和低氮的根际呼吸几乎相同,但实验后期高氮的根际呼吸显著比低氮高,在最后4 d时,高氮的根际呼吸速率是低氮的两倍多。本试验进一步证明了不同供氮水平下土壤呼吸的差异主要发生在植物生长的中后期。

在裸土下,高氮的土壤呼吸速率与温度的指数相关系数和 $Q_{10}$ 明显高于低氮,这说明土壤施氮能影响土壤呼吸与温度的关系及其温度对土壤呼吸的效应。其原因是裸土的土壤呼吸由土壤微生物决定的,氮素供应影响土壤微生物活动,因为氮是微生物的生命元素。

## 4 结 论

1) 植物生长显著影响土壤呼吸,植物生长中土壤呼吸速率的变化基本与植物生长规律相一致,随生长而增加,随衰老而减小。植物生长还改变了土壤呼吸的分配方式,种植玉米的土壤呼吸在各生长阶段的分配与裸土显著不同。

2) 供试土壤条件下,玉米不同生长阶段中根际呼吸对土壤呼吸的贡献在58%~98%之间,全生育期平均为93%~95%,呈高氮处理大于低氮处理的趋势。

3) 增加氮肥用量对土壤呼吸有显著影响,高氮的土壤呼吸比低氮高28%,两者差异主要发生在玉米生长的中后期即抽穗开花期和成熟期,说明缺氮导致土壤呼吸的显著降低。土壤施氮不仅影响土壤呼吸速率和呼吸量,还影响土壤呼吸在各生长阶段的分配,高氮下主要分配在拔节孕穗期和成熟期,低氮下拔节孕穗期最高。

4) 玉米生长下土壤呼吸与温度的相关性和温度的效应明显不同于裸土,表明玉米生长显著改变了土壤呼吸速率与温度的关系;裸土下高氮的相关系数和 $Q_{10}$ 高于低氮,说明土壤施氮对土壤呼吸与温度的关系也有影响。

## 参 考 文 献

- [1] Lohila A, Aurela M, Regina K, *et al.* Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: Effect of soil and crop type. *Plant and Soil*, 2003, 251: 303~317
- [2] 彭少麟,李跃林,任海,等. 全球变化下的土壤呼吸效应. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 705~713. Peng S L, Li Y L, Ren H, *et al.* Progress in research on soil respiration under the global change (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5): 705~713
- [3] 李凌浩,陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸. *生态学杂志*, 1998, 17(4): 45~51. Li L H, Chen Z Z. Soil respiration in grassland communities in the world (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(4): 45~51
- [4] 齐志勇,王宏燕,王江丽,等. 陆地生态系统土壤呼吸的研究进展. *农业系统科学与综合研究*, 2003, 19(2): 116~119. Qi Z Y, Wang H Y, Wang J L, *et al.* The development on the research of terrestrial ecosystem soil respiration (In Chinese). *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2003, 19(2): 116~119
- [5] Fu S, Cheng W, Susfalk R. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: A greenhouse pot experiment. *Plant and Soil*, 2002, 239: 133~140
- [6] Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 466~474
- [7] 卞田,吴融. 青贮玉米. 北京: 科学技术与文献出版社, 1992. 3~4. Bian T, Wu R. *Planting Maize for Silage* (In Chinese). Beijing: Scientific and Technical Literature Press, 1992. 3~4
- [8] Ben-Asher J, Cardon G E, Peters D, *et al.* Determining root activity distribution by measuring surface carbon dioxide fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 926~930
- [9] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 202~209. Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 202~209
- [10] Alvarez R, Alvarez C R. Temperature regulation of soil carbon dioxide production in the Humid Pampa of Argentina: Estimation of carbon fluxes under climate change. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34: 282~285
- [11] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1625~1635
- [12] Warembourg F R, Estelrich H D. Towards a better understanding of carbon flow in the rhizosphere a time dependent approach using car-

- bon-14. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30: 528~ 534
- [13] Domarski G, Kuzyakov Y, Siniakina S V, *et al.* Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*). *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2001, 164: 381~ 387
- [14] Fu S L, Cheng W X. Rhizosphere priming effects on the decomposition of soil organic matter in C4 and C3 grassland soils. *Plant and Soil*, 2002, 238: 289~ 294
- [15] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlation and controls. *Biochemistry*, 2000, 48: 71~ 90
- [16] 彭克明, 裴保义. 农业化学. 北京: 农业出版社, 1980. 73~ 74. Peng K M, Pei B Y. *Agricultural Chemistry (In Chinese)*. Beijing: Agricultural Press, 1980. 73~ 74
- [17] Warembourg F R, Esterlich H D. Plant phenology and soil fertility effects on below-ground carbon allocation for an annual (*Bromus madritensis*) and a perennial (*Bromus erectus*) grass species. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1 291~ 1 303
- [18] Liljeroth E, van Veen J A, Milier H J. Assimilate translocation to the rhizosphere of two wheat lines and subsequent utilization by rhizosphere microorganisms at two soil nitrogen concentrations. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22: 1 015~ 1 021
- [19] Johansson G. Below-ground carbon distribution in barley (*Hordeum vulgare* L.) with and without nitrogen fertilization. *Plant and Soil*, 1992, 144: 93~ 99

## SOIL RESPIRATION DURING MAIZE GROWTH PERIOD AFFECTED BY N APPLICATION RATES

Yang Lanfang<sup>1,2</sup> Cai Zucong<sup>1</sup>

(1 *The State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *College of Resources and Environmental Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China*)

**Abstract** The effects of maize growth and N-application ( $N\ 150\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$  and  $300\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ ) on soil respiration were investigated in pot experiment. The results showed that in the maize-planted soil, the soil respiration rate ranged from  $C\ 19.6$  to  $762.1\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}\ \text{h}^{-1}$ , but in the bare soil, it was in the range from  $C\ 4.3$  to  $36\ \text{mg}\ \text{m}^{-2}\ \text{h}^{-1}$ . Soil respiration rate was the lowest at the seedling stage and 73% of the soil respiration occurred at the elongating-booting stage and ripening stage. The contribution of maize rhizosphere respiration to soil respiration in each stage varied from 58% to 98% and was the lowest at the seedling stage. In the bare soil, N-application had no significant effect on soil respiration, whereas in the maize-planted soil, the soil respiration was 28% higher in the treatment of high N-application rate than in the treatment of low N-application rate during the whole maize-growing period. The significant difference between the two treatments only occurred in the metaphase and anaphase of maize growth. There was no significant correlation between soil respiration rate and temperature in the maize-planted soil, but in the bare soil, soil respiration rate was correlated exponentially to the temperature of the air, soil surface and at 5 cm depth significantly, and its correlativity was higher in the treatment of high N-application rate than in the treatment of low N-application rate. In conclusion, maize growth and soil N-application rate influenced not only the rate and intensity of soil respiration, but also the distribution of soil respiration in each developing stage of maize and the relationship between soil respiration rate and temperature.

**Key words** Maize growth; Soil respiration; Growing stage; Soil N-application; Rhizosphere respiration; Temperature