

微生物肥料在作物生長的作用機制

楊秋忠

教育部 終生榮譽 國家講座

國立中興大學土壤環境科學系 中興講座教授

通訊作者。E-mail: ccyoung@mail.nchu.edu.tw

摘要

微生物肥料係指其成分含具有活性微生物或休眠孢子，如細菌（含放線菌類）、真菌、藻類及其代謝產物之特定製劑，應用於作物生產具有提供植物養分或促進養分利用等功效之微生物物品。微生物肥料在作物生長的作用機制主要是應用在根圈微生物的活體之作用，以提供作物營養分來源、增進土壤營養狀況或改良土壤之理化、生物性質，藉以增加作物產量及品質者。土壤有益微生物的種類甚多，常被利用的主要是包括細菌、真菌、放線菌及藍綠藻等 4 大類。根圈微生物的作用機制包括植物營養的直接固氮菌的作用及間接溶解菌的作用供應的養分、增加作物與根部生長及吸收的作用、增進有機質分解及轉化的作用、增進作物抗逆境能力的作用、防止土壤及營養流失的作用、增加作物抗病的作用等。

關鍵詞：微生物肥料、作物生長機制。

前言

作物的生長及發育依賴氣候（適地適種）、品種（選別、健康種苗）、土壤管理（水分管理、合理化施肥）、栽培管理（地上部管理）、病蟲害管理等，凡是對作物生長及發育，以兼顧環境生態保育的措施都是作物健康管理的考量因素。作物生長在土壤，土壤是培育作物的培養基，因此，土壤與作物是人類生存所依賴者。「健康的土壤」是作物的健康的基礎，而土壤的健康依賴：(1) 能維持良好的物理、化學及生物性的環境（生態）；(2) 能提供充足的養分、水分及氧氣的需求（生產）；及 (3) 不含有毒物質，以維護動物及人體的健康（生活）。

不健康的土壤，作物容易產生生理病害及其他病蟲害的問題，若作物病蟲害多，就容易施用更多的農藥，農藥又再引起環境生態問題，在整體農業土壤環境惡性循環下，人類將是受害者。農業土壤微生物多樣性生態環境的品質質與人類生存

所依賴的糧食有密切關係，與人類的健康是相當程度的直接影響。因此，重視農業土壤微生物多樣生態環境品質的保育管理，是農業生產的重要工作。

肥料是農業經營必需的資材，肥料的產品是「指供給植物養分或促進養分利用之物品」(肥料管理法的定義)。因此，肥料有二大類的功能：第一類功能的肥料是提供含有植物養分的氮、磷、鉀、鈣、鎂、硫及微量的硼、銅、鋅、錳、鐵等元素。第二類功能肥料是可以促進養分利用的物品，就如土壤改良劑及微生物肥料。

「微生物肥料」係指人工培養之微生物製劑，在土壤中利用活體生物之作用以提供作物營養分來源、增進土壤營養狀況或改良土壤之理化、生物性質，藉以增加作物產量及品質者。因此，微生物肥料管理法規明訂微生物肥料「係指其成分含具有活性微生物或休眠孢子，如細菌(含放線菌類)、真菌、藻類及其代謝產物之特定製劑，應用於作物生產具有提供植物養分或促進養分利用等功效之微生物物品」。

農業上所使用的大量化學肥料，都需要消耗大量能源，化學氮素肥料的生產花費能源大，生產成本高；磷素肥料開採自磷礦，磷礦是有限的資源，經加酸處理製成磷肥，磷肥施入土壤後，除了被作物吸收移走外，不易被淋洗或流失，經長年施用磷肥，易有磷素過量，這些累積的磷素被土壤固定，有效性甚低。環境保護的時代潮流正在興起，施用過量化學肥料造成環境污染問題是不可忽視的，不當及過度施肥，都將地力劣化及污染河川、水庫及水源；水中的優氧化作用，致使水中藻類大量繁殖，影響水中生物的平衡，尤其硝態氮及磷之污染，也需加強管理。固氮菌、溶磷菌及菌根真菌之施用，可減少氮及磷肥施用，對環境的污染可減少到最低。

微生物肥料的重要性

土壤微生物的活動與土壤肥力及植物生長有密切關係，微生物的族群及活性與土壤碳源及能源的多寡有關，因為微生物的生長繁殖是利用土壤有限的含碳物質，包括有機質及二氧化碳，所能利用的能源是利用化學能或光能，因此土壤微生物在一般土壤中是相當穩定的生態體系，為了使土壤有益微生物活動及族群增加，不外乎有兩種主要的方法，一是增加碳源及能源，二是利用外在添加微生物的族群，或是二種方法同時增進，微生物肥料也就是利用這些原理所做的應用，

為了確保增加特定有益微生物時，是以直接添加該有益微生物為最有效的方法。

微生物肥料的種類很多，在作物生長的作用機制不外乎以營養的直接供應（如固氮菌）或利用性與有效性的提高，另外有可增加作物根系生長及吸收的作用，更有數量競爭對抗病蟲害為生物防治的產品，或正在發展中的生物農藥菌種。原有在土壤的有益微生物群落中，不同菌種的工作效率有差異，甚至差異很大，又何況有些農田土壤的有益菌為數甚少，因此為了確保在根圈中有明確的效率，接種有益微生物菌是有其必要性。

微生物肥料除了固氮微生物可固定空氣中的氮氣外，可增加氮肥來源，其他的微生物主要功能就是促進植物對養分利用的功能。因此，純微生物肥料的產品是不屬於第一類功能的肥料，就是說純微生物的肥料是不含有高量的氮磷鉀等元素，表示純微生物的肥料是屬第二類的功能。由於第一類含有植物養分的肥料在土壤的有效性及利用率不同，一般氮肥的植物利用率在 30-50%，磷肥在 10 - 20%，鉀肥在 30 - 50%，顯示含有養分之第一類肥料在施用後有流失（水淋洗或揮散至空氣中）或被固定（有效轉變成無效）的問題，表示第一類的肥料，不是全部的肥料養分可被植物吸收。因此，第二類的肥料如微生物肥料，能促進養分的有效性及利用率之物品就很重要了。

土壤微生物肥料的直接應用目的是以做為廣義肥料之應用，即為「微生物肥料」，利用活體生物供作養分營養分之來源（如固氮微生物）或增進土壤營養狀況者。微生物肥料的間接應用目的是利用有益微生物對肥料功能外的其他能力，例如：促進植物根系生長、增進作物養分及水分之收貯與輸送、增進作物對抗逆境（如抗旱、抗寒、耐水）、改善土壤物理、化學及生物性質、以菌數優勢之競爭保護植株或根系的功能、延長根系壽命、中和或分解毒害物質（如農藥、植物毒物質、污染物）、提高作物移植存活率，及提早開花等特性（楊 1993, 2010）。

微生物肥料在作物生長的作用機制

土壤有益微生物的種類甚多，常被利用的主要是包括細菌、真菌、放線菌及藍綠藻 4 大類。多年來微生物在作物生長的作用機制之文獻很多，楊（1993, 2010）、Hayat et al. (2010) 及 Ahemad & Kibretb (2014) 已有明確的回顧敘述，以下將其微生物肥料在作物生長的作用機制整合說明如下：

一、植物營養的直接及間接供應的作用機制

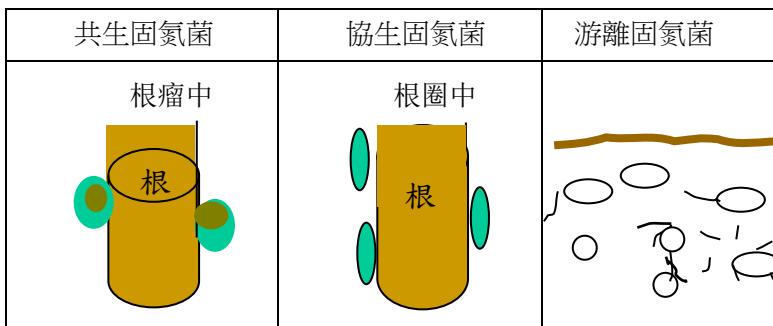
作物需要的營養元素—氮磷鉀大量及其他中量與微量元素。微生物肥料主要可協助土壤養分之直接供應及間接供應的作用機制，分別說明如下：

(一) 微生物肥料直接供應營養的作用機制

就是固氮菌的作用機制。空氣中含有約 80%的氮氣，植物本身不能直接利用它，只有靠共生或非共生固氮菌的直接固定作用，將氮氣固定為氮，再轉化成各種作物能利用的胺基化合物。這一類之菌類，主要是以「固氮菌」增加土壤中的氮素供應營養的作用機制為主，固氮菌包括游離、協生及共生 3 大類，分別說明如下：

- 1. 游離固氮菌：**在土壤中的種類甚多，從細菌至藍綠藻都有其例，如水田中固氮藍綠藻及光合細菌都有非共生固氮作用者。其中光合細菌能利用光能及 CO_2 ，在表土及水田中增加土壤有機碳素。包括 a. 藍菌門 (Cyanobacteria)：如 *Anabaena*、*Nostoc* 等。b. 變形菌門 (Proteobacteria)：如 *Gluconoacetobacter diazotrophicus*、*Azococcus*、*Azotobacter* 等。c. 古細菌 (Archaea)：*Methanosaarcina barkeri*、*Methanococcus thermolithotrophicus* 等。d. 厚壁菌門 (Firmicutes)：*Paenibacillus azotofixan*、*P. polymyxa*、*P. macerans* 等。多數為革蘭氏陽性，高 G+C 含量的則被劃入放線菌門。每年每公頃固氮量較低，約 1 公斤，但游離固氮菌在土壤微生物制衡能力及促進植物生長上扮演重要角色。
- 2. 協生性固氮菌：**此類的固氮菌是生長在作物根圈周圍或根表皮內外的菌類，無明顯共生構造的關係，其中在根部協生的固氮螺旋菌屬 (*Azospirillum*) 及固氮菌屬 (*Azotobacter*) 為最著名。每年每公頃固氮量約 3~5 公斤，但在促進植物生長上扮演重要角色。近年來對作物根內菌 (endophytes) 之研究已有很多之成果。
- 3. 共生性固氮菌：**可與高等及低等植物共生，例如細菌的根瘤菌及放線菌，分別與豆科及少數非豆科高等植物共生形成能固定空氣中氮氣的根瘤，另有藍綠藻與低等植物共生的現象 (如滿江紅、鐵樹) 等，進行吸收空氣中的氮氣，增加氮素來源。除了植物根部的共生固氮菌外，莖葉上也有共生固氮的微生物，但應用上則甚少。共生固氮的能力甚高，每年每公頃之固氮依豆科不同而異，大豆固氮約 100 公斤氮 (約 200 多公斤尿素)，有的可高達 400 公斤氮 (約 800 多公斤尿素)，這種固氮不只對豆科利用氮有利，豆科的殘質效應

在對下期作物所需之氮也甚為有效，可提高土壤肥力。固氮菌的培養簡便，用量少，成本低，與化學或有機質肥料相比，可以降低生產成本及提高農民所得。



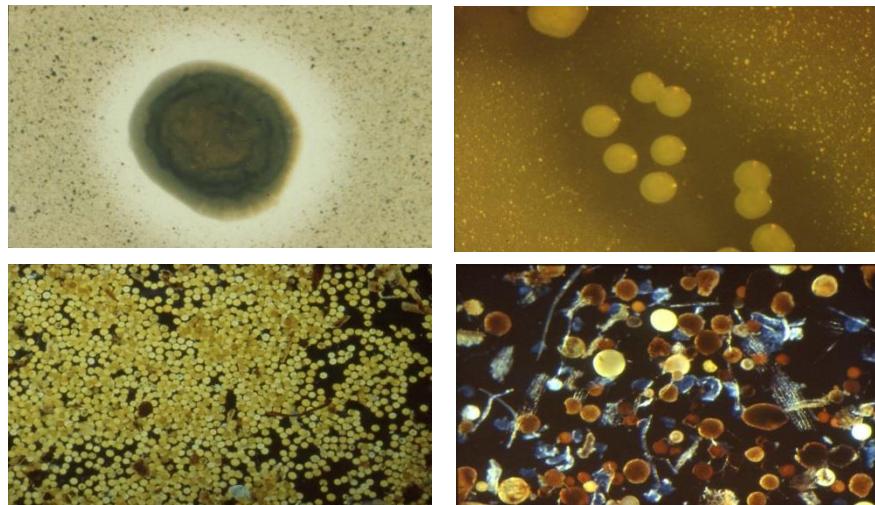
圖一、不同固氮菌發揮功能在土壤及作物關係的位置。

Fig. 1. The relevant position between soil and crops for different nitrogen-fixing bacteria to process their function.

(二) 微生物肥料間接供應營養的作用機制

就是溶解菌的作用機制，將土壤中不能被植物直接利用的養分，經微生物的作用溶解出來，間接提供植物利用。例如作物需要大量的磷肥，但磷素在土壤中的移動很慢，農田中有大量的無效性的結合磷及有機磷存在，這些菌能增進土壤結合磷素（鈣結合磷、鋁結合磷及鐵結合磷）的溶解及有機磷的分解，達到增加植物可吸收的磷。磷素被作物吸收是以根部接觸性的吸收為主，根部的溶磷菌及感染的菌根真菌，大大增加土壤中的磷有效性，菌根菌的共生與土壤的接觸及吸收面積，使磷素的吸收也大為增進，因此菌根在吸收養分上，以磷素效應最為顯著，其實吸收面積增加對其他元素之吸收也有增加的效果。尤其低磷含量的土壤，菌根真菌是非常需要的。

土壤中存在有或多或少的土生固氮菌、溶磷菌及菌根真菌，與植物共生後的效率也有好有壞。根部著生的根瘤或感染菌根真菌多寡，因此接種選育出的優良固氮菌、根瘤菌、或溶磷菌及菌根真菌，在一些土壤中有其需要性，作者等在臺灣 6 個農業改良場，進行大豆接種優良共生根瘤菌，平均增產 17%，高者達 40%。另接種菌根真菌者，平均可增產 15%，高者可達 65%，但如土壤含氮或磷量過多時，接種的效用就難能發揮。因此，施用微生物肥料就不需要大量施用化學肥料或有機質肥料。



圖二、不同溶磷菌種（上排）及菌根菌（下排）之種類形態。

Fig. 2. The kinds and morphology of different phosphorus-solubilizing bacteria (upper) and mycorrhizal fungus (lower).

二、增加作物生長、根部生長及吸收的作用機制

土壤微生物促進植物生長已有多年之成果，主要關鍵微生物就是根圈促進植物生長之細菌 (PGPR)，微生物促進植物生長可能的原因甚為複雜。可能的原因包括如下：

1. 根圈微生物中有合成轉化生成植物賀爾蒙（如IAA、GA、cytokinin等）或生成載鐵物質（如siderophores）的菌類，例如 *Rhizobium leguminosarum*、*Azotobacter* sp.、*Pseudomonas fluorescens*、*Azospirillum lipoferum*、*Bacillus megaterium*、*Bacillus subtilis*、*Paenibacillus* sp.、*Streptomyces acidiscabies*等，另根圈微生物生成水溶性B群之菸鹼酸 (niacin)、泛酸 (pantothenic acid)、硫胺 (thiamine)、核黃素 (riboflavine and)、生物素 (biotin) 等，均有促進植物或根系生長及有利各種養分之吸收。
2. 根圈物生產 ACC 脫氨酶 (1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase)，導致降低乙烯 (ethylene) 之生成，以促進根系生長，達到增加根部的吸收的表面積，可增加根部吸收營養，對植物健康及根系伸展有重要的角色。

三、增進有機質分解及轉化的作用機制

自然界物質循環系統中，在土壤中的有機質需要經過微生物分解成較小的分子或無機物時，才能被植物利用，例如許多土壤異營菌 (heterotrophy) 均能分解有

機質。當有機質分解過程中導致毒害有機物質的累積，將引起作物毒害作用，或無法直接利用這些有機質，另外土壤中的「腐植化作用」，土壤微生物都扮演重要的轉化角色。腐植化作用的腐植質能改善土壤的理化性質及碳的蓄存，更有利於農業生產，是未來土壤中的重要工程研究。

四、增進作物抗逆境能力的作用機制

作物吸收水分的部分主要是在根毛，菌根真菌 (mycorrhizal fungi) 共生在根部時，菌絲伸出根表面，就如同根毛的功能，有助於作物對水分吸收，當土壤缺乏水分時，菌絲即可協助作物吸收更多的水分，使作物抗旱、抗鹽、耐水能力增加，對旱作、缺水、多雨季節而言，菌根真菌的角色就顯得重要了。

農業土壤中有「人為」或「環境」加入的有毒物質，包括農藥、污染物、植物毒物質等，這些有毒的有機物質，需要靠土壤中的一群微生物分解及解毒，更可減少連作之障礙效應或減少前作對後作不利之效應。此外，微生物可減少重金屬之毒害，而增進作物生長。

五、防止土壤及營養流失的作用機制

土壤中有微生物可以分泌大量的胞外多醣 (exopolysaccharides)，可增進土壤團粒，進而增加雨水之土壤入滲作用，另外有許多的真菌可包紮土粒，形成相當穩定的團粒，可達到防止土壤流失及水土保持的期望。有些微生物可以吸收營養或減少營養轉化為易流失之形態，達到降低營養流失的功效，對作物生長均有助益。

六、增加作物抗病的作用機制

土壤微生物中有減少病蟲的菌類，減少病蟲害方面的菌類可分 (1) 競爭型及 (2) 殺害型的功效。競爭型是微生物肥料的功能，以菌數優勢之競爭保護植株或根系，達到減少病蟲害的目的，而殺害型是生物農藥的功能，以活性物質之殺害病蟲，達到治療植物病蟲害的目的。微生物肥料的根圈保護菌是棲所在根圈中，達到對減少病原菌之侵入，即有減少農藥使用的功效。而生物農藥是殺害病原菌的微生物則可產生之活性物質或抗生素，達到殺死或抑制病原菌的功效，或利用輕型卻不致命的病毒接種，達到對抗侵入的病毒，這些都是發展中「生物防治」的微生物應用。

微生物肥料的增加土壤菌數，可利用競爭型的方式抑制病原菌，而減少作物

病害。例如菌根真菌在作物根部的共生，佔據了根部的許多表面及內皮層的位置，減少病菌的侵入，由於菌根真菌與病菌間之抗衡，使作物根部有了保護的作用，即有減少農藥使用。

根圈微生物生成載鐵物質 (siderophores)、幾丁酶 (chitinases)、抗生物質 (antibiotics)、 β -1, 3 葡萄糖酶 (β -1, 3-glucanase)、螢光色素 (fluorescent pigments)、氰化物 (cyanides) 等，導致抑制植物病原菌。



a.不同大豆根瘤菌接種效果之篩選 b. 落花生之根部固氮根瘤

圖三、微生物肥料的篩選及根瘤形態。

Fig. 3. Screening for microbial fertilizers and the morphology of root nodules.

a. screen the effect of different Rhizobium inoculation on soybean, b. the nitrogen-fixing root nodules occur on the roots of peanut.

結 論

微生物肥料在作物生長的作用機制明確，因此可減少大量施用化學肥料，以微生物促進化學肥料之利用效率及降低土壤退化，並兼具環境生態保育的「土壤生物技術」。微生物肥料已成為新興產業之商品，行政院農委會農糧署已訂定法規管理及產品登記。施用微生物肥料之應用目的包括直接可減少化學肥料的施用的目的，及根圈保護的功能，促進植物根系生長及吸收水分與養分的能力，延長根系壽命，中和或分解毒害物質，提高作物移植存活率，及提早開花等特性的間接目的。施用微生物肥料無污染、無肥傷、施用量少及生態友善的優點，製成微生物肥料成本較化學及有機質肥料低廉。土壤有益微生物的種類甚多，常被利用的主要是包括細菌、真菌、放線菌及藍綠藻等 4 大類，無論整地與不整地栽培，或苗圃種植的播種方法及管理均與原來慣用方法相同，使用方法可視需要配合，甚

為簡便，主要是需將種子、根部或小苗能與接種劑充分接觸根部，即達到接種微生物的目標。

參考文獻

楊秋忠 1993 土壤與肥料 第 5 版 395 頁 農世股份有限公司 臺中。

楊秋忠 2010 土壤與肥料 第 9 版 542 頁 農世股份有限公司 臺中。

Ahemad, M. and M. Kibretb. 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. *J. King Saud Univ. Sci.* 26: 1-20.

Hayat, R., S. Ali, U. Amara, R. Khalid and I. Ahmed. 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Ann. Microbiol.* 60: 579-598.

Mechanisms in Crop Growth Promotion of Microbial Fertilizers

Chiu-Chung Young

National Chair Professor (Life honor)

Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University

Corresponding author. E-mail: ccyoung@mail.nchu.edu.tw

ABSTRACT

Microbial fertilizer means the active ingredients containing microorganisms or dormant spores, such as bacteria (including actinomycetes), fungi, algae and their metabolites, to provide plant nutrients for crop production or to facilitate the effectiveness of nutrient utilization. Mechanisms in crop growth promotion of microbial fertilizers were mainly applied in the role of rhizosphere microorganisms in order to provide the source of crop nutrients, enhance soil nutrient status of the soil or improve soil physical and chemical, biological properties for increasing crop yield and quality. Many types of beneficial soil microbes, often use the main microorganisms, including bacteria, fungi, actinomycetes and blue-green algae. Mechanisms in crop growth promotion of rhizosphere microorganisms were including the roles in the direct nitrogen-fixation, and indirect dissolving nutrients, the increasing in crop root growth and absorption effects, the enhancement in the role of organic matter decomposition and transformation, the enhancement in the crop resistance to stress, the increasing in the role of the ability to prevent soil and nutrient loss effects, and the increasing in the role of disease-resistant for crops.

Key words: Microbial fertilizer, Mechanisms of crop growth promotion.