

Note

## 옥수수 근권토양으로부터 N<sub>2</sub>O 환원 근권세균 *Pseudomonas* sp. M23의 분리 및 특성

김지윤, 이수연, 조경숙\*  
이화여자대학교 환경공학과

Received: March 24, 2023 / Revised: May 18, 2023 / Accepted: May 19, 2023

### Isolation and Characterization of a N<sub>2</sub>O-Reducing Rhizobacterium, *Pseudomonas* sp. M23 from Maize Rhizosphere Soil

Ji-Yoon Kim, Soo Yeon Lee, and Kyung-Suk Cho\*

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea

The N<sub>2</sub>O-reducing rhizobacterium, *Pseudomonas* sp. M23, was isolated from maize rhizosphere soil. The maximum N<sub>2</sub>O reduction rate of the strain M23 was 15.6 mmol·g-dry cell weight<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>. Its N<sub>2</sub>O reduction activity was not inhibited by diesel contaminant, and it was enhanced by the addition of the root exudates of maize and tall fescue. The remediation efficiency of diesel-contaminated soil planted with maize or tall fescue was not inhibited by inoculating with the strain M23. Root weights in the soil inoculated with the strain M23 were greater than those in the non-inoculated soil. These results suggest that *Pseudomonas* sp. M23 is a promising bacterium to mitigate N<sub>2</sub>O emissions during the remediation of diesel-contaminated soil.

**Keywords:** Nitrous oxide, reduction, rhizobacterium, *Pseudomonas*, maize, rhizosphere

석유계 탄화수소화합물(Petroleum hydrocarbons, PHs)은 매우 중요하며 널리 사용되고 있는 주요 에너지원이다. 그런데 PHs를 저장하거나 수송하는 과정에서 환경으로 누출되어 토양 및 지하수의 주요 오염원이 되고 있다[1–3]. PHs로 오염된 토양이나 지하수를 정화하는 환경친화적인 방법 중 최근들어 주목받고 있는 기술은 근권세균을 이용한 근권정화기술(rhizoremediation)이다[1, 2]. Rhizoremediation은 식물의 뿌리와 근권 미생물 간의 상호작용으로 PHs를 분해하는데[1, 2, 4, 5], 주로 탄소와 수소로 구성된 PHs 분해효율을 높이기 위해서 질소와 인을 추가하는 경우가 많다[1, 2]. 이렇게 추가된 질소화합물은 미생물에 의해 질산화 및 탈질 과정을 거쳐 질소가스(N<sub>2</sub>)의 형태로 대기 중으로 배출되게 된다. 하지만 이 과정의 부산물로 아산화질소(N<sub>2</sub>O)가 배출될 수 있다[6–9]. N<sub>2</sub>O는 non-CO<sub>2</sub> 온실가스 중 하나로, 지구

온난화지수가 이산화탄소의 약 298배이며, 대기에 배출된 후 약 121년정도 머무는 긴 체류시간을 가진 온실가스이다[10]. N<sub>2</sub>O는 성층권에서는 광화학반응에 의해 성층권의 오존층을 파괴하는 산화질소(NO)의 전구체이다[11]. 최근들어 PHs로 오염된 토양이나 지하수를 rhizoremediation기술로 정화하는 과정에서 N<sub>2</sub>O 배출 저감에 대한 몇몇 연구 결과가 보고되고 있다[1, 9, 12]. N<sub>2</sub>O 환원 근권세균을 접종하여 rhizoremediation 과정에서 N<sub>2</sub>O 배출량을 저감하고자 하는 연구도 진행되었다[9, 12]. Rhizoremediation 과정에서 온실가스인 N<sub>2</sub>O 배출을 최소화하기 위해서는 N<sub>2</sub>O 환원 근권세균을 지속적으로 탐색하여 신규 미생물자원을 확보하는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 옥수수 근권 토양으로부터의 N<sub>2</sub>O 환원 세균을 순수 분리 및 동정하고, 분리 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 활성에 미치는 디젤과 뿌리삼출물의 영향을 조사하였다. 또한, 옥수수와 톨페스큐를 이용한 디젤 오염 토양의 rhizoremediation 효율과 식물 생장에 미치는 분리 균주의 접종 효과를 평가하였다.

대학 옥상 정원에서 재배 중인 옥수수의 근권토양을 채취

\*Corresponding author

Phone: +82-2-3277-2393, Fax: +82-2-3277-3275  
E-mail: kscho@ewha.ac.kr

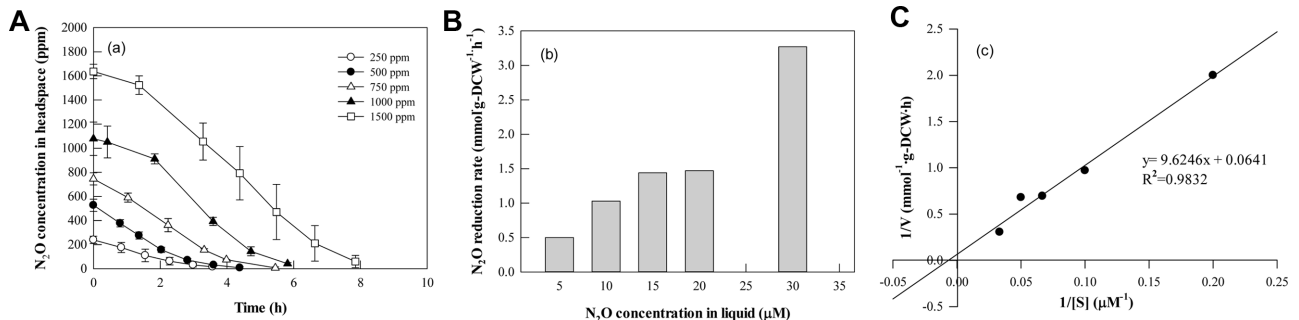
하여 실험실에서 건조한 후 체를 쳐서 입경이 2 mm 이하인 근권토양을 준비하였다[9]. 옥수수 근권토양을 접종원으로 N<sub>2</sub>O 환원 농화배양액을 기존 논문에서 기술한 방법대로 준비하였다[9]. 이 농화배양액을 멸균수로 10배씩 연속희석 후 Difco™ LB-agar 배지에 도말한 후 30℃에서 48시간동안 배양하였다[9]. 배지에 성장한 단일 colony를 무작위로 선별한 후, 각 선별 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 활성을 기존 논문에서 기술한 방법대로 평가하였다[9]. 평가 균주 중 N<sub>2</sub>O 환원 활성이 가장 우수한 균주를 M23으로 명명하고, 16S rRNA gene 염기서열 분석법으로 동정하였다[9]. 분리균주의 염기서열은 NCBI GenBank database (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)에 등록하였다(Accession no. MW882231). 또한, 본 연구에서 분리한 M23 균주와 선행연구에서 분리한 TF716 균주의 차이를 비교하기 위해 27F/1492R primer sets을 이용하여 16S rRNA gene 염기서열을 분석하였다[13].

옥수수 근권토양에서 분리한 M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 활성에 미치는 N<sub>2</sub>O 농도, 디젤 첨가 및 뿌리삼출물 첨가 영향은 무기염배지를 9 ml 주입한 120 ml-혈청병을 이용하여 조사하였다[9, 12]. N<sub>2</sub>O 농도 영향 실험을 위해, N<sub>2</sub>O 가스(99%, 동아특수가스, 서울, 한국)을 혈청병의 기상 농도로 250–1500 ppm이 되도록 주입하였다. 디젤 첨가 영향 실험을 위해, 디젤을 0–30,000 mg·l<sup>-1</sup> 농도로 첨가하고 N<sub>2</sub>O는 1,000 ppm이 되도록 주입하였다. 전 연구[12]와 동일한 방법으로 준비한 옥수수과 톨페스큐의 뿌리삼출물에 무기염배지의 조성 화합물을 첨가하고, N<sub>2</sub>O는 1,000 ppm이 되도록 주입하였다. 모든 실험에서 탄소원으로 glucose와 sodium acetate를 100 mg·COD·l<sup>-1</sup>가 되도록 주입하였고, M23 균주 현탁액은 1 ml 첨가하였다[9]. 각 조건의 혈청병을 30℃, 150 rpm에서 배양하면서, 실린지를 이용하여 혈청병 상부 가스를 주기적으로 채취하여 N<sub>2</sub>O 농도를 전기화학검출기가 장착된 가스 크로마토그래피(Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)를 이용하여 측정하였다. 가스상의 N<sub>2</sub>O 농도(ppm)로부터 헨리상수를 이용하여 용존 N<sub>2</sub>O 농도를 구하였다[8].

M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원속도는 기상과 용존 N<sub>2</sub>O 농도 변화값을 이용하여 계산하였다[8, 9].

옥수수와 톨페스큐를 이용한 디젤 오염 토양의 rhizoremediation 효율과 식물 생장에 미치는 분리 균주의 접종 효과는 다음의 방법으로 조사하였다. 기존 연구와 동일한 방법으로 디젤 오염 토양(10,000 mg-diesel·kg-soil<sup>-1</sup>)에 옥수수(*Zea mays*)와 톨페스큐(*Festuca arundinacea*)을 식재한 화분을 준비하였다[9]. 각 화분당 옥수수는 5개체, 톨페스큐는 10개체씩 식재하였다. M23 균주 현탁액을 옥수수와 톨페스큐를 식재한 화분에 접종하였다(2 × 10<sup>6</sup> CFU·g-soil<sup>-1</sup>). 대조군으로 M23 균주를 접종하지 않는 화분도 준비하였다. 실험군과 대조군 화분은 식물 종류별 각각 3개씩 준비하였다. 야외 환경에서 59일 동안 일주일에 두 번씩 충분히 물을 주며 관리한 후에[9], 화분으로부터 토양과 식물체를 회수하였다. 토양 시료를 동결 건조한 후, 잔존 디젤 농도를 분석하였다. 디젤 농도 분석은 기존 논문에 기술한 방법대로 수행하였다[9]. 회수한 식물체로부터 뿌리 부분을 절단한 후, 뿌리에 붙어있는 토양은 세척 과정을 통해 충분히 제거한 후, 70℃에서 72시간 건조한 후 무게를 측정하였다. 실험결과와 통계 분석은 one-way ANOVA와 two-way ANOVA 분석법을 사용하였다[9].

옥수수 근권토양에서 분리한 N<sub>2</sub>O 환원세균인 M23 균주는 *Pseudomonas* sp.로 동정되었다. 27F/1492R primer sets을 이용하여 본 연구에서 분리한 M23과 선행연구의 *Pseudomonas* sp. TF716 균주의 차이를 비교한 결과, M23 균주는 *P. aeruginosa*와 유사도가 높았으나(98.78%), TF716 균주는 *Pseudomonas* sp. 13632A와 유사도가 높았다(97.97%). N<sub>2</sub>O 농도가 증가할수록 M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 속도도 증가하였고(Fig. 1A, 1B), 최대 N<sub>2</sub>O 환원속도(V<sub>max</sub>)는 15.6 mmol·g-dry cell<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>이었다(Fig. 1C). 선행 연구를 통해 N<sub>2</sub>O 환원세균으로 *Aeromicrobium* sp., *Alicyciphilus* sp., *Azospira* sp., *Bacillus* sp., *Ralstonia* sp. 및 *Paracoccus* sp. 등이 토양, 폐수처리장 및 인분에서 분리되었다[8, 14–



**Fig. 1. N<sub>2</sub>O reduction by *Pseudomonas* sp. M23.** (A) Time profile of the N<sub>2</sub>O concentration, (B) Effect of N<sub>2</sub>O concentration on N<sub>2</sub>O reduction rate, (C) Lineweaver-Burk plot.

19]. 본 연구에서 분리한 M23 균주와 동일한 *Pseudomonas* 속 N<sub>2</sub>O 환원세균도 토양, 매립지 침출액 처리용 바이오필터, 그리고 폐수처리장에서 분리되어 그 특성이 보고되었다[17, 19, 20–22]. 밀의 근권토양에서 N<sub>2</sub>O 환원 근권세균인 *Agrobacterium/Rhizobium* sp., *Alcaligenes* sp. 및 *Pseudomonas* sp.를 분리한 선행연구가 있다[23]. 또한, 톨페스큐 근권에서 분리한 N<sub>2</sub>O 환원 근권세균인 *Pseudomonas* sp. TF716가 보고되고 있다[9]. 선행 연구에서 순수 분리한 N<sub>2</sub>O 환원세균의 N<sub>2</sub>O 환원 속도는 1.60–23.85 범위이었다 [8, 9, 17, 19, 20]. M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원속도(15.6 mmol·g-dry cell<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>)는 상기 범위에 속하며, 톨페스큐 근권에서 분리한 TF716 균주의 N<sub>2</sub>O 환원속도(18.9 mmol·g-dry cell<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>)와 유사한 수준이었다[9]. 본 연구에서 옥수수 근권에서 분리한 M23 균주는 옥수수 근권에서 분리한 N<sub>2</sub>O 환원 근권세균으로 처음 보고되는 균주이다.

M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 활성에 미치는 디젤 첨가 영향을 조사한 결과를 Table 1에 제시하였다. 모든 디젤 첨가(5,000–30,000 mg·l<sup>-1</sup>) 조건에서 M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 속도는 디젤을 첨가하지 않은 조건에서의 N<sub>2</sub>O 환원 속도와 유의차가 없었는데, 이는 M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 활성은 디젤에 의해 촉진도 저해도 받지 않음을 의미한다. 한편, M23 균주는 디젤을 분해할 능력은 없었다(결과 미제시).

Table 2에 옥수수 혹은 톨페스큐 뿌리삼출물 첨가가 M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 활성에 미치는 영향을 제시하였다. 뿌리삼

**Table 1. Effect of diesel on the N<sub>2</sub>O reduction rate of *Pseudomonas* sp. M23.**

Diesel concentration (mg-diesel·l <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O reduction rate (mmol·g-DCW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
0	3.15 ± 0.3 <sup>ab*</sup>
5000	2.48 ± 0.5 <sup>b</sup>
10000	3.05 ± 0.2 <sup>ab</sup>
20000	3.80 ± 0.1 <sup>a</sup>
30000	2.47 ± 0.6 <sup>b</sup>

\*Different letters indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).

**Table 2. Effect of root exudate on the N<sub>2</sub>O reduction rate of *Pseudomonas* sp. M23.**

Root exudate	COD concentration (mg·l <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O removal rate (mmol·g-DCW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
Control (No addition)	0	3.08 ± 0.4 <sup>b*</sup>
Maize	780	4.32 ± 0.2 <sup>a</sup>
Tall fescue	750	4.06 ± 0.0 <sup>a</sup>

\*Different letters indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).

**Table 3. Effect of the inoculation of *Pseudomonas* sp. M23 on diesel removal and root growth during rhizoremediation.**

Plant	Inoculation	Diesel removal efficiency (%)	Dry root weight (g)
Maize	Control (No inoculation)	99.77 ± 0.3 <sup>a*</sup>	1.57 ± 0.6 <sup>b</sup> (Median: 1.47)
	M23 inoculation	99.60 ± 0.6 <sup>a</sup>	1.64 ± 0.4 <sup>b</sup> (Median: 1.57)
Tall fescue	Control (No inoculation)	99.35 ± 0.9 <sup>a</sup>	8.46 ± 2.3 <sup>b</sup> (Median: 7.90)
	M23 inoculation	99.30 ± 0.0 <sup>a</sup>	11.03 ± 1.9 <sup>b</sup> (Median: 10.71)

\*Different letters indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).

출물을 첨가하지 않은 조건에 비해, 옥수수와 톨페스큐 뿌리삼출물을 첨가한 조건에서 M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원속도는 각각 1.4배와 1.3배 유의적으로 증가하였다( $p < 0.05$ ). 뿌리삼출물은 유기산, 지방산, 알코올, 인산, 아미노산, 당류 등 다양한 물질로 구성되어 근권 미생물의 성장을 촉진시키는 생장인자로 활용된다[12, 24, 25]. 옥수수와 톨페스큐 뿌리삼출물에 함유된 이러한 화합물은 M23 균주의 탄소원 혹은 질소원 등의 영양분으로 활용되어 M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 활성이 향상된 것으로 생각된다. 이전 연구에서도 옥수수 혹은 톨페스큐 뿌리삼출물에 의해 혼합균 혹은 순수분리 세균의 N<sub>2</sub>O 환원 활성이 향상된 것이 보고되었다[9, 12, 26]. 이들 뿌리삼출물을 N<sub>2</sub>O 환원 농화배양액에 첨가하면 N<sub>2</sub>O 환원속도가 1.3–2.7배 증가하였다[12]. 또한, 톨페스큐 근권에서 분리한 *Pseudomonas* sp. TF716의 N<sub>2</sub>O 환원 속도도 옥수수와 톨페스큐 뿌리삼출물 첨가에 의해 1.5배 향상되었다[9].

옥수수와 톨페스큐는 유류로 오염된 토양을 정화하는데 이용되는 대표적인 식물이다[1, 2]. 본 연구에서는 이들 식물을 이용한 디젤 오염 토양의 정화효율과 식물의 뿌리 생장에 미치는 M23 균주 접종 효과를 평가하였다. 그 결과, M23 균주 접종과 무접종 조건에서의 디젤 분해효율은 유의적인 차이가 없었다(Table 3). 일반적으로 오염된 토양에서 식물의 생장은 오염물질에 의해 저해를 받는데, 이러한 저해는 세균의 접종에 의해 억제할 수 있는 기존의 연구결과가 보고되고 있다. 선행 연구 결과, 디젤 오염 토양에서 옥수수의 생장은 *Gordonia* sp. 접종에 의해 향상되었다[27]. 토양에서 디젤에 의한 라이그라스의 줄기와 뿌리의 생장 저해 효과는 *Burkholderia phytofirmans* 접종에 의해 감소됨이 보고되고 있다[28]. 또한, 디젤 오염 토양에서 멩그로브의 생장 저해는 *Bacillus*, *Sphingomonas* 및 *Rhodococcus*의 접종에 의해 감소되었다고 선행연구가 보고된 바 있다[29]. 그런데, 본 연구에서, M23 미접종 조건에 비해, 옥수수와 톨페스큐의 뿌리

무게는 M23 균주 접종에 의해 약간 증가하였으나 통계적으로 유의적인 차이는 없었다(Table 3). 즉, N<sub>2</sub>O 환원 세균인 M23 균주 접종은 디젤 제거 효율이나 식물 생장에 악영향을 미치지 않았다. 이러한 결과는 M23 균주 접종을 통해 식물에 의한 유류 오염 토양 정화를 저해하지 않고, 정화과정에서 N<sub>2</sub>O 배출을 저감할 수 있음을 시사한다.

## 요약

옥수수 근권 토양으로부터의 N<sub>2</sub>O 환원 근권세균인 *Pseudomonas* sp. M23을 분리하였다. M23 균주의 최대 N<sub>2</sub>O 환원속도는 15.6 mmol·g-dry cell<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>이었다. M23 균주의 N<sub>2</sub>O 환원 활성은 디젤 오염물에 의해 저해받지 않았고, 옥수수와 톨페스큐 뿌리삼출물 첨가에 의해 향상되었다. M23 균주 접종은 옥수수와 톨페스큐를 이용한 디젤 오염 토양의 정화 효율을 저해하지 않았다. M23 균주를 접종한 토양에서 재배한 식물체의 뿌리무게는 미접종 토양에서의 뿌리무게보다 컸으나, 유의적 차이는 없었다. 이러한 결과는 *Pseudomonas* sp. M23이 유류 오염 토양의 근권정화 과정에서 N<sub>2</sub>O 배출을 저감하는데 활용 가능한 유용한 세균임을 시사한다.

## Acknowledgments

This study was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government through the Ministry of Science and ICT (MSIT) (2019R1A2C2006701 & 2022R1A2C2006615).

## Conflict of Interest

The authors have no financial conflicts of interest to declare.

## References

- Seo Y, Cho KS. 2020. Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils and greenhouse gas emission characteristics: A review. *Microbiol. Biotechnol. Lett.* **48**: 99-112.
- Hussain I, Puschenreiter M, Gerhard S, Schöftner P, Yousaf S, Wang A, et al. 2018. Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Improvement opportunities and field applications. *Environ. Exp. Bot.* **147**: 202-219.
- Varjani SJ. 2017. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresour. Technol.* **223**: 277-286.
- Huang H, Tang J, Niu Z, Giesy JP. 2019. Interactions between electrokinetics and rhizoremediation on the remediation of crude oil-contaminated soil. *Chemosphere* **229**: 418-425.
- Pant R, Pandey P, Kotoky R. 2016. Rhizosphere mediated bio-degradation of 1,4-dichlorobenzene by plant growth promoting rhizobacteria of *Jatropha curcas*. *Ecol. Eng.* **94**: 50-56.
- Singh BP, Hatton BJ, Singh B, Cowie AL, Kathuria A. 2010. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *J. Environ. Qual.* **39**: 1224-1235.
- Hénault C, Gossel A, Mary B, Roussel M, Leonard J. 2012. Nitrous oxide emission by agricultural soils: a review of spatial and temporal variability for mitigation. *Pedosphere* **22**: 426-433.
- Park HJ, Kwon JH, Yun J, Cho KS. 2020. Characterization of nitrous oxide reduction by *Azospira* sp. HJ23 isolated from advanced wastewater treatment sludge. *J. Environ. Sci. Health Part A-Toxic/Hazard Subst. Environ. Eng.* **55**: 1459-1467.
- Kim JY, Cho KS. 2022. Inoculation effect of *Pseudomonas* sp. TF716 on N<sub>2</sub>O emissions during rhizoremediation of diesel-contaminated soil. *Sci. Rep.* **12**: 13018.
- IPCC. Climate change 2013. The physical science basis, Working group 1 contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge Univ. Press.
- Johnston H. 1971. Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust. *Science* **173**: 517-522.
- Lee S, Kim S, Kim YJ, Lee YY, Cho KS. 2021. Characterization of CH<sub>4</sub>-oxidizing and N<sub>2</sub>O-reducing bacterial consortia enriched using rhizosphere of maize and tall fescue. *Microbiol. Biotechnol. Lett.* **49**: 225-238.
- Heuer H, Krsek M, Baker P, Smalla K, Wellington EM. 1997. Analysis of actinomycete communities by specific amplification of genes encoding 16S rRNA and gel-electrophoretic separation in denaturing gradients. *Appl. Environ. Microbiol.* **63**: 3233-3241.
- Dalsing BL, Truchon AN, Gonzalez-Orta ET, Milling AS, Allen C. 2015. *Ralstonia solanacearum* uses inorganic nitrogen metabolism for virulence, ATP production, and detoxification in the oxygen-limited host xylem environment. *mBio* **6**: e02471.
- Ramasamy D, Kokcha S, Lagier JC, Nguyen TT, Raoult D, Fournier PE. 2012. Genome sequence and description of *Aeromicrobium massiliense* sp. nov. *Stand. Genomic Sci.* **7**: 246-257.
- Read-Daily BL, Sabba F, Pavissich JP, Nerenberg R. 2016. Kinetics of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) formation and reduction by *Paracoccus pantotrophus*. *AMB Express* **6**: 85.
- Suenaga T, Riya S, Hosomi M., Terada A. 2018. Biokinetic characterization and activities of N<sub>2</sub>O-reducing bacteria in response to various oxygen levels. *Front. Microbiol.* **9**: 697.
- Wu S, Zhuang G, Bai Z, Cen Y, Xu S, Sun H, et al. 2018. Mitigation of nitrous oxide emissions from acidic soils by *Bacillus amylo-liquefaciens*, a plant growth-promoting bacterium. *Glob. Change Biol.* **24**: 2352-2365.
- Zhou Y, Zhao S, Suenaga T, Kuroiwa M, Riya S, Terada A. 2022. Nitrous oxide-sink capability of denitrifying bacteria impacted by nitrite and pH. *Chem. Eng. J.* **428**: 132402.

20. Miyahara M, Kim SW, Fushinobu S, Takaki K, Yamada T, Watanabe A, *et al.* 2010. Potential of aerobic denitrification by *Pseudomonas stutzeri* TR2 to reduce nitrous oxide emissions from wastewater treatment plants. *Appl. Environ. Microbiol.* **76**: 4619-4625.
21. Yokoyama K, Yumura M, Honda T, Ajitomi E. 2016. Characterization of denitrification and net N<sub>2</sub>O-reduction properties of novel aerobically N<sub>2</sub>O-reducing bacteria. *Soil Sci. Plant Nutr.* **62**: 230-239.
22. Zheng M, He D, Ma T, Chen Q, Liu S, Ahmad M, *et al.* 2014. Reducing NO and N<sub>2</sub>O emission during aerobic denitrification by newly isolated *Pseudomonas stutzeri* PCN-1. *Bioresour. Technol.* **162**: 80-88.
23. Uyskin-Tonne A, Hadar Y, Minz D. 2019. Altering N<sub>2</sub>O emissions by manipulating wheat root bacterial community. *Sci. Rep.* **9**: 7613.
24. Naveed M, Brown LK, Raffan AC, George TS, Bengough AG, Roose T, *et al.* 2017. Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, origin and time. *Eur. J. Soil Sci.* **68**: 806-816.
25. Liu W, Hou J, Wang Q, Yang H, Luo Y, Christie P. 2015. Collection and analysis of root exudates of *Festuca arundinacea* L. and their role in facilitating the phytoremediation of petroleum contaminated soil. *Plant Soil* **389**: 109-119.
26. Henry S, Texier S, Hallet S, Bru D, Dambreville C, Chèneby D, *et al.* 2008. Disentangling the rhizosphere effect on nitrate reducers and denitrifiers: insight into the role of root exudates. *Environ. Microbiol.* **10**: 3082-3092.
27. Hong SH, Ryu HW, Cho KS. 2011. Rhizoremediation of diesel-contaminated soil using the plant growth-promoting rhizobacterium *Gordonia* sp. S2RP-17. *Biodegradation* **22**: 593-601.
28. Afzal M, Khan S, Iqbal S, Mirza MS, Khan QM. 2013. Inoculation method affects colonization and activity of *Burkholderia phytofirmans* PsJN during phytoremediation of diesel-contaminated soil. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **85**: 331-336.
29. Khan AL, Numan M, Bilal S, Asaf S, Crafword K, Imran M, *et al.* 2022. Mangrove's rhizospheric engineering with bacterial inoculation improve degradation of diesel contamination. *J. Hazard. Mater.* **423**: 127046.