

nyelője a hidroxil-gyökkel (OH) való reakciója. A hidroxil-gyökök légköri mennyiségét azonban számtalan folyamat befolyásolhatja a légkör UV-átbocsátó képességétől (pl. ózonnemesség, aeroszolmennyiség) számos más nyomanyag (szén-monoxid, ózon, nitrogén-oxidok, vízgőz stb.) mennyiségéig, miközben igen alacsony koncentrációja miatt közvetlenül gyakorlatilag nem mérhető. Az OH-gyök mennyiség reálisan feltételezhető változása azonban önmagában nem idézhet elő akkora változást az izotópösszetételben, mint amekkorát a mérések mutatnak.

A koncentráció-növekedés földrajzi eloszlása nem elsősorban az iparosított vagy sarkvidéki területek, inkább a trópusi, szubtrópusi területek növekvő metánkibocsátását sugallja (Nisbet *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2021). Nincs dokumentált jele annak, hogy a mezőgazdasági tevékenységben, rizstermesztésben, állattenyésztésben az elmúlt másfél-két évtizedben ugrásszerű változások következtek volna be itt. Valószínűbbnek tűnik inkább, hogy az észlelt koncentráció-növekedés mögött az egyes trópusi régiókban megnövekedett csapadékmennyiség miatti mocsarasodás áll. Az időszakosan mocsaras területek kiterjedése azonban még műholdról is nehezen követhető, e mocsarak metánkibocsátást meghatározó sajátosságairól pedig lényegében nincs adatunk.

Ha valóban a mocsarasodó területek – akár a trópusokon, akár később a sarkvidéki területeken – játsszák a meghatározó szerepet a metánkoncentráció növekedésében, az az emberi eredetű éghajlatváltozás egy igen aggasztó öngerjesztő folyamatára mutathat rá, ami önmagában is alááshatja a kitűzött éghajlatpolitikai célok elérhetőségét (Ganesan *et al.*, 2019; Cain *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2022; Nisbet *et al.*, 2022b). A tisztánlátáshoz sokkal több mérésre lenne szükség. A metánkoncentráció-mérések örvendetesen szaporodnak a világ fejlettebb országaiban. Sajnos, éppen a kritikus trópusi területek lefedetlenek, ezért ott az eseti expedíciós mérések mellett (Gondwe *et al.*, 2021; Stell *et al.*, 2021; Gauci *et al.*, 2022; Nisbet *et al.*, 2022a) mindenképpen folyamatos megfigyelésekre is szükség lenne. A kulcsfontosságú stabilizotóp-összetétel mérések ($^{12}\text{CH}_4$, $^{13}\text{CH}_4$) még meglehetősen ritkák

a világban, de Magyarországon már folytak ilyen mérések (Varga *et al.*, 2021). A legkritikusabb kérdés, hogy ténylegesen mekkora a fosszilis és a biológiai források hozzájárulásának az aránya a jelenlegi koncentráció-növekedésben? Ennek eldöntését szolgálhatná a szén 14-es tömegszámú, radioaktív izotópját tartalmazó metán ($^{14}\text{CH}_4$) légköri mennyiségének mérése, mivel a fosszilis eredetű metán ezt a felső légkörben keletkező, gyorsan lebomló izotópot egyáltalán nem tartalmazza. Ilyen mérések azonban egyelőre csak elvétve folynak (Ganesan *et al.*, 2019; Graven *et al.*, 2019; Zazzeri *et al.*, 2021). Reméljük azonban, hogy Magyarországon, az Atommagkutató Intézetben néhány éven belül már tudunk ilyen méréseket is végezni.

Lehetőségek

A globális éghajlatváltozás előrehaladtával, a magasabb hőmérséklet és a regionálisan megnövekvő csapadékmennyiség miatt a mocsaras területek intenzívebb metánkibocsátása várható. Számítani kell az olvadó permafroszt talajokból származó metánmennyiség növekedésére is (Dean *et al.*, 2018; Kleinen *et al.*, 2021). Bár a jómódú országokban több millióan lehetnek készek csökkenteni a húsfogyasztásukat a környezet védelme érdekében redukálva az állattenyésztésből származó metán mennyiségét, számolnunk kell azzal a néhány milliárd emberrel is, aki örülne, ha néha neki is kerülne hús a tányérjába. És persze valamivel több rizs is. Változatlan technológiák mellett, rövidtávon belül reálisan nem várható az élelmiszertermelés metánkibocsátásának számottevő csökkenése, sőt, némi növekedés sem lenne meglepő. A széntüzelés visszaszorulásával a bányászathoz kapcsolódó kibocsátás csökkenni fog. Ellátásbiztonsági okokból azonban a széntüzelésű erőművek egy részének helyére egyelőre földgázüzemelésű erőművek lépnek, ami a földgázkitermelés, szállítás és a kapcsolódó metánkibocsátás növekedését okozhatja. Mindez növekvő légköri metánkoncentrációt, növekvő metánból fakadó melegedési járulékot jelentene, annak minden nemkívánatos következményével.

időt nyer, az az éghajlatváltozás miatt potenciálisan kihaló fajokra gondolva szó szerint is életet nyerhet. Ezért mondható nagyon fontosnak, hogy a metán jelentőségét végre az éghajlatpolitika is felismerte.

2021. szeptember közepén az Amerikai Egyesült Államok, az Európai Unió és néhány más ország ígéretet tett az antropogén metánkibocsátás 2030-ig történő 30%-os csökkentésére (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_4785), amelyhez az ENSZ 2021. november eleji Éghajlatváltozási Konferenciáján (COP26) további mintegy 100 ország csatlakozott (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_21_5766). A 30%-os kibocsátás-csökkentés éghajlatpolitikai szempontból komoly előrelépés, de – mint láttuk – csaknem nettó ráfordítások nélkül is elérhető. Nem kevesen vetik fel, hogy ennél többet is tehetnénk az éghajlatváltozás mérséklése érdekében (*Hausfather and Forster, 2021; Nature Geoscience Editorial, 2021*).

Irodalom

- Cain, M., Jenkins, S., Allen, M.R., Lynch, J., Frame, D.J., Macey, A.H., Peters, G.P., 2022. Methane and the Paris Agreement temperature goals. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 380, 20200456. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0456>
- Dean, J.F., Middelburg, J.J., Röckmann, T., Aerts, R., Blauw, L.G., Egger, M., Jetten, M.S.M., de Jong, A.E.E., Meisel, O.H., Rasigraf, O., Slomp, C.P., in 't Zandt, M.H., Dolman, A.J., 2018. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world. *Rev. Geophys.* 56, 207–250. <https://doi.org/10.1002/2017RG000559>
- Feng, L., Palmer, P.I., Zhu, S., Parker, R.J., Liu, Y., 2022. Tropical methane emissions explain large fraction of recent changes in global atmospheric methane growth rate. *Nat. Commun.* 13, 1378. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28989-z>
- Ferretti, D.F., Miller, J.B., White, J.W.C., Etheridge, D.M., Lassez, K.R., Lowe, D.C., Meure, C.M.M., Dreier, M.F., Trudinger, C.M., Ommen, T.D.v., Langenfelds, R.L., 2005. Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years. *Science* 309, 1714–1717. <https://doi.org/10.1126/science.1115193>
- Flückiger, J., Monnin, E., Stauffer, B., Schwander, J., Stocker, T.F., Chappellaz, J., Raynaud, D., Barnola, J.-M., 2002. High-resolution Holocene N₂O ice core record and its relationship with CH₄ and CO₂. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 16, 10–11–10–18. <https://doi.org/10.1029/2001GB001417>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.L., Frame, D., Lunt, D.J., Mauritsen, T., Palmer, M.D., Watanabe, M., Wild, M., Zhang, H., 2021. *The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity*. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.
- Fung, I., John, J., Lerner, J., Matthews, E., Prather, M., Steele, L.P., Fraser, P.J., 1991. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 96, 13033–13065. <https://doi.org/10.1029/91JD01247>
- Ganesan, A.L., Schwietzke, S., Poulter, B., Arnold, T., Lan, X., Rigby, M., Vogel, F.R., van der Werf, G.R., Janssens-Maenhout, G., Boesch, H., Pandey, S., Manning, A.J., Jackson, R.B., Nisbet, E.G., Manning, M.R., 2019. Advancing Scientific Understanding of the Global Methane Budget in Support of the Paris Agreement. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 33, 1475–1512. <https://doi.org/10.1029/2018GB006065>
- Gauci, V., Figueiredo, V., Gedney, N., Pangala, S.R., Stauffer, T., Weedon, G.P., Enrich-Prast, A., 2022. Non-flooded riparian Amazon trees are a regionally significant methane source. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 380, 20200446. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0446>
- Gondwe, M.J., Helfter, C., Murray-Hudson, M., Levy, P.E., Mosimanyana, E., Makati, A., Mfundisi, K.B., Skiba, U.M., 2021. Methane flux measurements along a floodplain soil moisture gradient in the Okavango Delta, Botswana. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 379, 20200448. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0448>
- Graven, H., Hocking, T., Zazzeri, G., 2019. Detection of Fossil and Biogenic Methane at Regional Scales Using Atmospheric Radiocarbon. *Earth's Future* 7, 283–299. <https://doi.org/10.1029/2018EF001064>
- Hausfather, Z., Forster, P., 2021. Analysis: Do COP26 promises keep global warming below 2C? Carbon Brief 10.11.2021 <https://www.carbonbrief.org/analysis-do-cop26-promises-keep-global-warming-below-2c>. (Last accessed: 21 January 2022)
- Kleinen, T., Gromov, S., Steil, B., Brovkin, V., 2021. Atmospheric methane underestimated in future climate projections. *Environ. Res. Lett.* 16, 094006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1814>
- Lan, X., Nisbet, E.G., Dlugokencky, E.J., Michel, S.E., 2021. What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄

- sub> observations and the way forward. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 379, 20200440. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0440>
- Nature Geoscience Editorial, 2021. Methane matters. *Nat. Geosci.* 14, 875–875. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00875-1>
- Nisbet, E.G., Allen, G., Fisher, R.E., France, J.L., Lee, J.D., Lowry, D., Andrade, M.F., Bannan, T.J., Barker, P., Bateson, P., Bauguitte, S.J.-B., Bower, K.N., Broderick, T.J., Chibesakunda, F., Cain, M., Cozens, A.E., Daly, M.C., Ganesan, A.L., Jones, A.E., Lambakasa, M., Lunt, M.F., Mehra, A., Moreno, I., Pasternak, D., Palmer, P.I., Percival, C.J., Pitt, J.R., Riddle, A.J., Rigby, M., Shaw, J.T., Stell, A.C., Vaughan, A.R., Warwick, N.J., E. Wilde, S., 2022a. Isotopic signatures of methane emissions from tropical fires, agriculture and wetlands: the MOYA and ZWAMPS flights. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 380, 20210112. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0112>
- Nisbet, E.G., Jones, A.E., Pyle, J.A., Skiba, U., 2022b. Rising methane: is there a methane emergency? *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 380, 20210334. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0334>
- Nisbet, E.G., Manning, M.R., Dlugokencky, E.J., Fisher, R.E., Lowry, D., Michel, S.E., Myhre, C.L., Platt, S.M., Allen, G., Bousquet, P., Brownlow, R., Cain, M., France, J.L., Hermansen, O., Hossaini, R., Jones, A.E., Levin, I., Manning, A.C., Myhre, G., Pyle, J.A., Vaughn, B.H., Warwick, N.J., White, J.W.C., 2019. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 33, 318–342. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>
- Ocko, I.B., Sun, T., Shindell, D., Oppenheimer, M., Hristov, A.N., Pacala, S.W., Mauzerall, D.L., Xu, Y., Hamburg, S.P., 2021. Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environ. Res. Lett.* 16, 054042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf9c8>
- Rigby, M., Montzka, S.A., Prinn, R.G., White, J.W.C., Young, D., O'Doherty, S., Lunt, M.F., Ganesan, A.L., Manning, A.J., Simmonds, P.G., Salameh, P.K., Harth, C.M., Mühle, J., Weiss, R.F., Fraser, P.J., Steele, L.P., Krummel, P.B., McCulloch, A., Park, S., 2017. Role of atmospheric oxidation in recent methane growth. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 114, 5373–5377. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616426114>
- Saunoy, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond, P.A., Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Patra, P.K., Ciais, P., Arora, V.K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D.R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K.M., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N., Crevoisier, C., Crill, P.M., Covey, K., Curry, C.L., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M.I., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., Ishizawa, M., Ito, A., Janssens-Maenhout, G., Jensen, K.M., Joos, F., Kleinen, T., Krummel, P.B., Langenfelds, R.L., Laruelle, G.G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K.C., McNorton, J., Miller, P.A., Melton, J.R., Morino, I., Müller, J., Murguía-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O'Doherty, S., Parker, R.J., Peng, C., Peng, S., Peters, G.P., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W.J., Rosentretter, J.A., Segers, A., Simpson, I.J., Shi, H., Smith, S.J., Steele, L.P., Thornton, B.F., Tian, H., Tohjima, Y., Tubiello, F.N., Tsuruta, A., Viovy, N., Voulgarakis, A., Weber, T.S., van Weele, M., van der Werf, G.R., Weiss, R.F., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., Zhuang, Q., 2020. The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Sherwood, O.A., Schwietzke, S., Arling, V.A., Etiope, G., 2017. Global inventory of gas geochemistry data from fossil fuel, microbial and burning sources, version 2017. *Earth Syst. Sci. Data* 9, 639–656. <https://doi.org/10.5194/essd-9-639-2017>
- Stell, A.C., Douglas, P.M.J., Rigby, M., Ganesan, A.L., 2021. The impact of spatially varying wetland source signatures on the atmospheric variability of $\delta^{13}\text{C}$ - CH_4 . *Philosoph. Trans. Roy. Soc. A: Math. Phys. Engin. Sci.* 379, 20200442. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0442>
- Turner, A.J., Frankenberg, C., Wennberg, P.O., Jacob, D.J., 2017. Ambiguity in the causes for decadal trends in atmospheric methane and hydroxyl. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 114, 5367–5372. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616020114>
- Varga, T., Fisher, R.E., France, J.L., Haszpra, L., Jull, A.J.T., Lowry, D., Major, I., Molnár, M., Nisbet, E.G., László, E., 2021. Identification of potential methane source regions in Europe using $\delta^{13}\text{C}$ measurements and trajectory modeling. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 126, e2020JD033963. <https://doi.org/10.1029/2020JD033963>
- WMO, 2021. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2020. WMO Greenhouse Gas Bulletin 17
- Yin, Y., Chevallier, F., Ciais, P., Bousquet, P., Saunoy, M., Zheng, B., Worden, J., Bloom, A.A., Parker, R.J., Jacob, D.J., Dlugokencky, E.J., Frankenberg, C., 2021. Accelerating methane growth rate from 2010 to 2017: leading contributions from the tropics and East Asia. *Atmos. Chem. Phys.* 21, 12631–12647. <https://doi.org/10.5194/acp-21-12631-2021>
- Zazzeri, G., Xu, X., Graven, H., 2021. Efficient sampling of atmospheric methane for radiocarbon analysis and quantification of fossil methane. *Environ. Sci. Technol.* 55, 8535–8541. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03300>

A 47. Meteorológiai Tudományos Napon, 2021. november 18-án elhangzott előadás bővített és szerkesztett változata.