

Einfluss des Klimawandels auf Stickstoffflüsse im Grünlandökosystem

Evi Deltedesco^{1*}, Katharina Keiblinger¹, Maria Naynar¹, Hans-Peter Piepho², Markus Gorfer³, Erich M. Pötsch⁴ und Sophie Zechmeister-Boltenstern¹

Einleitung

Klimaforscher kündigen für die nächsten Jahrzehnte einen deutlichen Anstieg der Lufttemperatur und des atmosphärischen Kohlendioxids (CO₂) an (IPCC, 2014; World-Meteorological-Organization, 2017). Weltweit konnte bereits ein Temperaturanstieg von 0.85 °C zwischen 1880 und 2012 gemessen werden (IPCC, 2014). In Österreich hingegen wurde bereits in den letzten Jahren ein signifikanter Anstieg der Mitteltemperatur von 1 bis 7 °C verzeichnet (BMNT, 2015). Dadurch wird verdeutlicht, dass in gemäßigten Zonen Europas noch ein größerer Temperaturanstieg zu erwarten ist (Koch *et al.*, 2007). Diese Temperaturerhöhungen werden durch den immer massiveren Ausstoß von CO₂ und anderen Spurengasen verursacht. Insbesondere die atmosphärischen Konzentrationen von Kohlendioxid (CO₂) und Distickstoffmonoxid („Lachgas“, N₂O), zwei wichtige direkte Treibhausgase, erreichten im Jahr 2016 einen neuen historischen Höchststand von 403.3 ppm und 328.9 ppb. Dies bedeutet einen Anstieg von 145 % für CO₂ und 122 % für N₂O seit vorindustrieller Zeit (IPCC, 2014; World-Meteorological-Organization, 2017). In Österreich (Salzburg) wurde bereits 2015 erstmals eine CO₂-Konzentration von 400 ppm überschritten (BMNT, 2015). Ungefähr 10 – 12 % der globalen, durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen stammen aus dem Agrarsektor (Smith *et al.*, 2007). Indirekte Treibhausgase, wie Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH₃) werden vor allem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe bzw. bei der Herstellung von Mineraldüngern erzeugt. Jedoch sollten die Emissionen, welche im Boden produziert werden, nicht vernachlässigt werden. Sie können zu einer Erhöhung des troposphärischen Ozons führen und durch Ablagerung des Nitrats den Boden ansäuern. Diese Prozesse können wiederum zu einer Erhöhung der N₂O-Emissionen führen. Lachgas weist ungefähr ein 300 Mal so hohes Erwärmungspotential wie CO₂ auf (Akiyama *et al.*, 2004; Ferretti *et al.*, 2017; Galloway *et al.*, 2003; Smith *et al.*, 1998).

Es gibt bereits viele Belege dafür, dass Erwärmung und erhöhtes atmosphärisches CO₂ direkte, sowie indirekte Treibhausgase beeinflussen können, indem sie die Produktion der Pflanzen, mikrobielle Aktivitäten im Boden sowie das Mikroklima verändern. Im Grünland wurden bereits verschiedenste Klimaexperimente durchgeführt, wobei meist nur einzelne Wetter-/Klimafaktoren, wie z.B. Temperatur oder Niederschlag, bewusst gesteuert und ver-

ändert wurden (Luo *et al.*, 2006; Moser *et al.*, 2018; Shaw *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2008). Diese Experimente wiesen Schwierigkeiten bei der Interpretation der Daten auf, da es viele Störfaktoren (Stickstoffablagerung, Streuabbau und Stickstoffverfügbarkeit) gibt, die sich ändern oder interagieren können (Davidson *et al.*, 2000; Pilegaard *et al.*, 2006). Diese Störparameter können keine objektive Schätzung der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen liefern. Deshalb stellen Experimente zur Klimafolgenforschung eine besondere Herausforderung dar, insbesondere, wenn dabei gleich mehrere Faktoren zugleich verändert werden. Die Stärke, aber auch die Wechselwirkungen der beiden Klimafaktoren (erhöhtes atmosphärisches CO₂ und Erwärmung) sind noch weitgehend unbekannt (Yue *et al.*, 2017). Deshalb haben wir eine kombinierte Feld-Laborstudie durchgeführt, um einerseits diese Störparameter kleinstmöglich zu halten und gleichzeitig mehrere Effekte (erhöhtes atmosphärisches CO₂ und Erwärmung) auf direkte, aber auch indirekte Treibhausgasemissionen zu testen.

Material und Methoden

Auf der „Climgrass“ Versuchsfläche in Raumberg-Gumpenstein werden die für das Jahr 2050 prognostizierten Erhöhungen von Temperatur und CO₂-Konzentration in verschiedenen Abstufungen und Kombinationen simuliert. Die Lufttemperatur wird in drei Abstufungen verändert: ambient (entspricht dem jeweiligen aktuellen Zustand), +1.5 °C und +3 °C. Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird ebenfalls in drei Abstufungen verändert: ambient, +150 ppm und +300 ppm.

Im Oktober 2016 wurden von insgesamt 27 Versuchspartnern intakte Bodenbohrkerne entnommen und für weitere Analysen zur BOKU nach Wien gebracht. Die oberirdische Biomasse wurde entfernt und die Bohrkerne wurden mit 30 kg N ha⁻¹ Ammoniumnitrat gedüngt. Anschließend wurden die Bohrkerne in einem im-Haus gebauten Inkubator bei Raumtemperatur (20 °C) für 12 Stunden inkubiert und NH₃-Emissionen wurden gemessen. Anschließend wurden die Bohrkerne wiederum für 12 Stunden bei 20 °C inkubiert und es konnten mit einem Chemolumineszenz-Analysator NO_x-Emissionen analysiert werden. Zum Schluss wurden die Bohrkerne nochmals bei verschiedenen Temperaturen (0, 5, 10, 15 und 20 °C) inkubiert. Durch eine manuelle Beprobung (4 Proben pro Stunde pro Temperatur) konnten

¹ Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

² Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Bereich Biostatistik, Universität Hohenheim, Fruwirthstraße 23, D-70599 Stuttgart

³ Austrian Institute of Technology, Bioresources, Konrad-Lorenz-Straße 24, A-3430 Tulln

⁴ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: DI Evi DELTEDESCO, evi.deltedesco@boku.ac.at



Gasproben für die Analyse von Lachgas gezogen werden. Diese wurden anschließend mit einem Gas-Chromatographen gemessen. Durch den sukzessiven Temperaturanstieg konnte die Temperatursensitivität mikrobieller Prozesse (Q_{10}), welche bei der Treibhausgasproduktion beteiligt sind, bestimmt werden. Nach den Treibhausgasmessungen wurde der Boden jedes Bohrkernes gesiebt und homogenisiert, um verschiedenste Bodenparameter (mikrobielle Biomasse, Wassergehalt, mineralischer N-Gehalt...) zu bestimmen (detaillierte Methodenbeschreibung in Deltedesco *et al.*, 2019).

Ergebnisse und Diskussion

NH_3 -Emissionen

Es konnten keine behandlungsbedingten Unterschiede der NH_3 -Emissionen festgestellt werden. Generell können Bö-

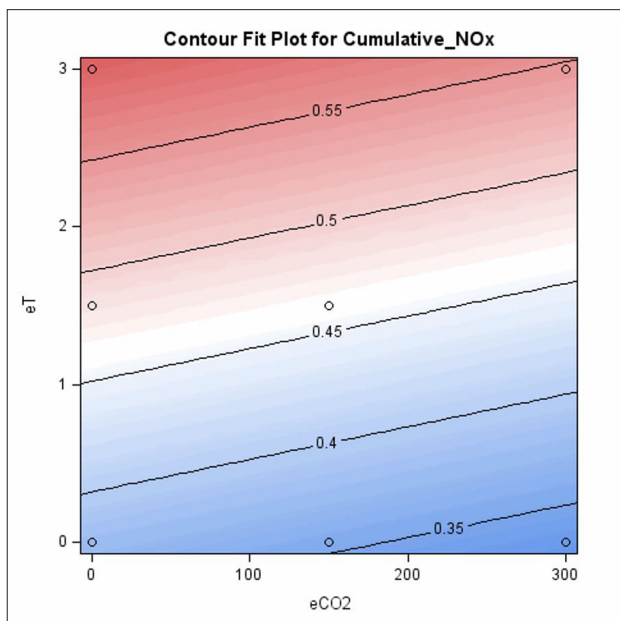


Abbildung 1: Contour Plot der NO_x -Emissionen (in $mg\ m^{-2}$) entlang eines Temperaturgradienten (y-Achse) und eines CO_2 -Gradienten (x-Achse).

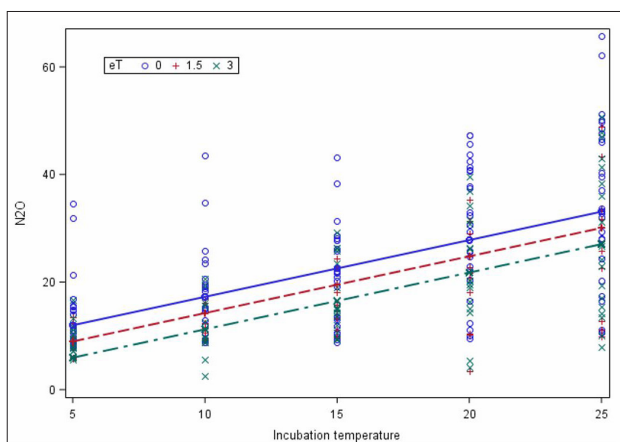


Abbildung 2: Lineare Regression der Temperatur für N_2O -Emissionen bei verschiedenen Inkubationstemperaturen.

den als Ammoniakquelle oder -senke wirken, normalerweise begünstigt eine Temperaturerhöhung jedoch die Umwandlung von gelösten in gasförmiges NH_3 . Dies gilt aber nur, wenn andere Faktoren, wie z.B. Ammonium-Verfügbarkeit oder der pH-Wert konstant sind (Flechard *et al.*, 2015). Obwohl eine vorübergehende Temperaturerhöhung die NH_3 -Emissionen aktiv erhöhen könnte (Flechard *et al.*, 2015), scheint dies für zwei Jahre Erwärmung nicht zu gelten. Auch wenn die direkte Reaktion der NH_3 -Emissionen langfristig mit einer Temperaturerhöhung gesteigert wird, können indirekte Auswirkungen, wie ein Rückgang des Wassergehaltes oder die Abnahme von Ammonium bestimmende Faktoren sein.

NO_x -Emissionen

NO_x -Emissionen zeigten starke Wechselwirkungen mit extrahierbarem Gesamtstickstoff und Nitrat im Boden. Stickstoffverfügbarkeit im Boden wurde von Pilegaard (2013) als entscheidender Faktor für NO_x -Emissionen beschrieben. In unserer Studie stiegen die NO_x -Emissionen vor allem in den erwärmten Versuchspartellen an (Abbildung 1). Wir gehen davon aus, dass die Erhöhung der NO_x -Emissionen vor allem durch einen indirekten Effekt der Erwärmung auf die Bodenfeuchtigkeit hervorgerufen wird. Dies ist im Einklang mit den Ergebnissen in Schaufler *et al.* (2010), in dieser Studie wurde berichtet, dass vor allem in wärmeren und trockeneren Teilen Europas NO_x -Emissionen aus dem Boden zunehmen.

N_2O -Emissionen

Interessanterweise zeigten unsere Klimawandel-Behandlungen keinen signifikanten Unterschied zu den Kontrollplots. Arnone III and Bohlen (1998) stellte bereits nach zwei Vegetationsperioden positive Auswirkungen von erhöhtem CO_2 auf N_2O -Emissionen fest, die hauptsächlich mit verbesserten Bodenwasserbedingungen einhergingen. Erhöhtes CO_2 kann zu einer geringeren Stomataöffnung und dies wiederum zu einer verringerten Transpiration der Pflanzen führen und so indirekt den Wasserhaushalt der Pflanzen beeinflussen. Es kann jedoch Jahre dauern, bis sich solche Prozesse in den Pflanzen ändern (Morgan *et al.*, 2011; Morgan *et al.*, 2004). In vielen Untersuchungen wurden diese positiven Auswirkungen auf das Bodenwasser saisonal und hauptsächlich dann, wenn die Wasserverfügbarkeit begrenzt war, beschrieben (Morgan *et al.*, 2004; Roy *et al.*, 2016; Selsted *et al.*, 2012). Erwärmung kann sich durch höhere Evapotranspirationsraten stärker auf die Bodenfeuchtigkeit auswirken als erhöhtes CO_2 (Liu *et al.*, 2009).

In verschiedensten Studien wurden bereits Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchtigkeit und N_2O -Emissionen gezeigt (Bateman and Baggs, 2005; Werner *et al.*, 2014), dies konnte auch in unserer Studie durch eine positive Korrelation/ Wechselwirkung bestätigt werden.

In unserer Studie hat wahrscheinlich eine relativ hohe räumliche Variabilität die behandlungsbedingten Unterschiede der N_2O -Emissionen verringert, dies wurde auch in anderen Studien berichtet (Arias-Navarro *et al.*, 2017; Harris *et al.*, 2018). Die Climgrass-Versuchsfläche zeichnet sich durch eine hohe Pflanzenvariabilität aus und auch

eine unterschiedliche Pflanzenzusammensetzung kann zu wesentlichen Unterschieden bezüglich N_2O -Emissionen beitragen (Parkin, 1987).

Temperatursensitivität

Die Lachgas Emissionen in unserer Studie stiegen signifikant mit sukzessiver Temperaturerhöhung an, dies wurde bereits zuvor in anderen Studien beschrieben (Díaz-Pinés *et al.*, 2014). Die gemessenen N_2O -Emissionen, während der Inkubation bei sukzessivem Temperaturanstieg, reagierten signifikant auf die erhöhte Temperatur-Behandlung im Feld. Jansen-Willems *et al.* (2016) beschrieb bereits in seiner Studie eine Verringerung der N_2O -Emissionen durch einen Temperaturanstieg. In unserer Studie konnte der Effekt der Erwärmung aber erst durch die wiederholten Messungen bei sukzessivem Anstieg der Inkubationstemperatur festgestellt werden.

Die Temperatursensitivität (Q_{10}) zeigte keinen konsistenten Verlauf und nahm mit steigender Inkubationstemperatur nur geringfügig ab. Wir gehen davon aus, dass die Lachgas-Bildung im Boden viele verschiedene Bodenprozesse und verschiedenste Mikroorganismen umfasst, die alle zeitweilig durch erhöhte Temperatur stimuliert werden. Diese verschiedenen Effekte können sich jedoch multiplizierend auf den Stickstoff-Kreislauf sowie auf die N_2O -Emissionen auswirken und die Temperatursensitivität signifikant beeinflussen (Butterbach-Bahl *et al.*, 2013).

Conclusio

Unsere Ergebnisse weisen darauf hin, dass N_2O - und NO_x -Emissionen aus dem Boden vor allem durch die indirekten Auswirkungen der Erwärmung auf die Bodenfeuchtigkeit beeinflusst werden. Basierend auf derzeit verfügbare Daten, stellen Sekundäreffekte, wie z.B. Änderungen der Pflanzenleistungen (Stomataverschluss und Evapotranspiration) sowie abiotische Bodeneigenschaften (Wassergehalt) die Haupttreiber für mikrobielle Prozesse im Boden dar und diese sind wiederum verantwortlich für die Bildung der Treibhausgase. Es ist daher äußerst wichtig, diese komplexen Wechselwirkungen zu untersuchen und zu verstehen, um Vorhersagen von Klimawandel-Szenarien für biogeochemische Bodenprozesse zu verbessern.

Literatur

Akiyama, H.; I.P. McTaggart, B.C. Ball and A. Scott (2004): N_2O , NO , and NH_3 Emissions from Soil after the Application of Organic Fertilizers, Urea and Water. *Water, Air, and Soil Pollution* 156, 113-129.

Arias-Navarro, C.; E. Díaz-Pinés, S. Klatt, P. Brandt, M.C. Rufino, K. Butterbach-Bahl and L.V. Verchot (2017): Spatial variability of soil N_2O and CO_2 fluxes in different topographic positions in a tropical montane forest in Kenya. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122, 514-527.

Arnone III, J.A. and P.J. Bohlen (1998): Stimulated N_2O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO_2 . *Oecologia* 116, 331-335.

Bateman, E.J. and E.M. Baggs (2005): Contributions of nitrification and denitrification to N_2O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils* 41, 379-388.

BMNT (2015): ÖKS15, Klimaszenarien für Österreich, Daten-Methoden-Klimaanalyse.

Butterbach-Bahl, K.; E.M. Baggs, M. Dannenmann, R. Kiese and S. Zechmeister-Boltenstern (2013): Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130122.

Davidson, E.A.; M. Keller, H.E. Erickson, L.V. Verchot and E. Veldkamp (2000): Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides: using two functions based on soil nitrogen availability and soil water content, the hole-in-the-pipe model characterizes a large fraction of the observed variation of nitric oxide and nitrous oxide emissions from soils. *Bioscience* 50, 667-680.

Deldedesco, E.; K.M. Keiblinger, M. Naynar, H.-P. Piepho, M. Gorfer, M. Herndl, M. Bahn, E.M. Pötsch and S. Zechmeister-Boltenstern (2019): Trace gas fluxes from managed grassland soil subject to multifactorial climate change manipulation. *Applied Soil Ecology*.

Díaz-Pinés, E.; A. Schindlbacher, M. Godino, B. Kitzler, R. Jandl, S. Zechmeister-Boltenstern and A. Rubio (2014): Effects of tree species composition on the CO_2 and N_2O efflux of a Mediterranean mountain forest soil. *Plant and Soil* 384, 243-257.

Ferretti, G.; K.M. Keiblinger, M. Zimmermann, D. Di Giuseppe, B. Faccini, N. Colombani, A. Mentler, S. Zechmeister-Boltenstern, M. Coltorti and M. Mastrocicco (2017): High resolution short-term investigation of soil CO_2 , N_2O , NO_x and NH_3 emissions after different chabazite zeolite amendments. *Applied soil ecology* 119, 138-144.

Flechard, C.R.; R.S. Massad, B. Loubet, E. Personne, D. Simpson, J.O. Bash, E.J. Cooter, E. Nemitz and M.A. Sutton (2015): Advances in Understanding, Models and Parameterizations of Biosphere-Atmosphere Ammonia Exchange, in: Massad, R.-S., Loubet, B. (Eds.), *Review and Integration of Biosphere-Atmosphere Modelling of Reactive Trace Gases and Volatile Aerosols*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 11-84.

Galloway, J.N.; J.D. Aber, J.W. Erisman, S.P. Seitzinger, R.W. Howarth, E.B. Cowling and B.J. Cosby (2003): The nitrogen cascade. *Bioscience* 53, 341-356.

Harris, E.; T. Ladreiter-Knauss, K. Butterbach-Bahl, B. Wolf and M. Bahn (2018): Land-use and abandonment alters methane and nitrous oxide fluxes in mountain grasslands. *Science of The Total Environment* 628-629, 997-1008.

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel in Climate Change.

Jansen-Willems, A.B.; G.J. Lanigan, T.J. Clough, L.C. Andresen and C. Müller (2016): Long-term elevation of temperature affects organic N turnover and associated N_2O emissions in a permanent grassland soil. *SOIL* 2, 601-614.

Koch, O.; D. Tschirko and E. Kandeler (2007): Temperature sensitivity of microbial respiration, nitrogen mineralization, and potential soil enzyme activities in organic alpine soils. *Global Biogeochemical Cycles* 21.

Liu, W.; Z. Zhang and S. Wan (2009): Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. *Global Change Biology* 15, 184-195.

Luo, Y.; D. Hui and D. Zhang (2006): Elevated CO_2 stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis. *Ecology* 87, 53-63.

Morgan, J.A.; D.R. McCain, E. Pendall, D.M. Blumenthal, B.A. Kimball, Y. Carrillo, D.G. Williams, J. Heisler-White, F.A. Dijkstra and M. West (2011): C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. *Nature* 476, 202.

Morgan, J.A.; D.E. Pataki, C. Körner, H. Clark, S.J. Del Grosso, J.M. Grünzweig, A.K. Knapp, A.R. Mosier, P.C.D. Newton, P.A. Niklaus, J.B. Nippert, R.S. Nowak, W.J. Parton, H.W. Polley and M.R. Shaw (2004): Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO_2 . *Oecologia* 140, 11-25.

- Moser, G.; A. Gorenflo, K. Brenzinger, L. Keidel, G. Braker, S. Marhan, T.J. Clough and C. Müller (2018): Explaining the doubling of N_2O emissions under elevated CO_2 in the Giessen FACE via in-field ^{15}N tracing. *Global change biology* 24, 3897-3910.
- Parkin, T.B. (1987): Soil Microsites as a Source of Denitrification Variability. *Soil Science Society of America Journal* 51, 1194-1199.
- Pilegaard, K. (2013): Processes regulating nitric oxide emissions from soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130126.
- Pilegaard, K.; U. Skiba, P. Ambus, C. Beier, M. Pihlatie and T. Vesala (2006): Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N_2O). *Biogeosciences*.
- Roy, J.; C. Picon-Cochard, A. Augusti, M.-L. Benot, L. Thiery, O. Darsenville, D. Landais, C. Piel, M. Defosse, S. Devidal, C. Escape, O. Ravel, N. Fromin, F. Volaire, A. Milcu, M. Bahn and J.-F. Soussana, (2016): Elevated CO_2 maintains grassland net carbon uptake under a future heat and drought extreme. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 6224-6229.
- Schaufler, G.; B. Kitzler, A. Schindlbacher, U. Skiba, M.A. Sutton and S. Zechmeister-Boltenstern (2010): Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science* 61, 683-696.
- Selsted, M.B.; L. van der Linden, A. Ibrom, A. Michelsen, K.S. Larsen, J.K. Pedersen, T.N. Mikkelsen, K. Pilegaard, C. Beier and P. Ambus (2012): Soil respiration is stimulated by elevated CO_2 and reduced by summer drought: three years of measurements in a multifactor ecosystem manipulation experiment in a temperate heathland (CLIMATE). *Global Change Biology* 18, 1216-1230.
- Shaw, M.R.; E.S. Zavaleta, N.R. Chiariello, E.E. Cleland, H.A. Mooney and C.B. Field (2002): Grassland Responses to Global Environmental Changes Suppressed by Elevated CO_2 . *Science* 298, 1987-1990.
- Smith, K.A.; P.E. Thomson, H. Clayton, I.P. McTaggart and F. Conen (1998): Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment* 32, 3301-3309.
- Smith, P.; D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara and C. Rice (2007). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical transactions of the royal Society B: Biological Sciences* 363, 789-813.
- Werner, C.; K. Reiser, M. Dannemann, L.B. Hutley, J. Jacobeit and K. Butterbach-Bahl (2014): N_2O , NO , N_2 and CO_2 emissions from tropical savanna and grassland of northern Australia: an incubation experiment with intact soil cores. *Biogeosciences* 11, 6047-6065.
- World-Meteorological-Organization (2017): WMO Greenhouse Gas Bulletin, The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016.
- Yue, K.; D.A. Fornara, W. Yang, Y. Peng, C. Peng, Z. Liu and F. Wu (2017): Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: additive effects are common. *Ecology Letters* 20, 663-672.
- Zhou, J.; S. Kang, C.W. Schadt and C.T. Garten (2008): Spatial scaling of functional gene diversity across various microbial taxa. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 7768-7773.