

Zmeny pôdnej štruktúry zrnitostne ľahkej pôdy po 41-ročnom hnojení minerálnymi hnojivami

Changes in soil structure of light-textured soil after 41-years of fertilization with mineral fertilizers

Vladimír Šimanský, Martin Juriga, Jerzy Jonczak

In the modern agriculture the mineral fertilizers are considered to be a significant intensifying factor, predominantly in sandy soils. The usage of mineral fertilizers results in the changes of the soil properties and therefore the farmers should acquire the knowledge from this area so that they can react flexibly. For this the reason was established long-term experiment (start in 1975) at the sandy soil (in the locality Skierniewice, Poland), where the soil structure, contents of total and available macronutrients and Mn oxides after the application of the mineral fertilizers were studied (Control – no fertilizers, NPK – NPK fertilizers, CaNPK – CaNPK fertilizers). The soil samples were taken from the depth 0–25 cm in the autumn 2017 in all above-mentioned treatments. The results showed that in CaNPK, content of dry-sieved macro-aggregates (DSA_{ma}) in size class 1–0.5 mm significantly decreased by 26% and 24% compared to Control and NPK treatment. In comparison to NPK treatment, CaNPK fertilization had statistically significant effect on increase of higher size classes of DSA_{ma} on one hand, and it decreased content of dry-sieved micro-aggregates (DSA_m) on the other. In CaNPK, contents of water-stable macro-aggregates (WSA_{ma}) in size classes >5 mm and 5–3 mm were higher by 70% and 44%, respectively than in control. Content of available K increased from 28.6 mg.kg⁻¹ in control to 78.7 mg.kg⁻¹ in NPK and to 81.8 mg.kg⁻¹ in CaNPK. The NPK treatment, compared to control showed significant decrease in available Ca and Mg by 31 and 27%, respectively. Ninety-four years continuous inputs of NPK as well as CaNPK significantly increased total content of Mn by 39% and 33%, respectively compared to control. Contents of free Mn oxides varied from 0.013 g.kg⁻¹ to 0.077 g.kg⁻¹ and both NPK and CaNPK mineral fertilization decreased their contents. In comparison to control, the content of amorphous Mn oxides was significantly decreased by mineral fertilization – in case of NPK by 71% and in case of CaNPK by 57%. The same trend (decrease due to mineral fertilization) in crystalline Mn oxides was observed. Our results confirmed positive effects of Ca and Mg on contents of macro-aggregates, however a strong effect of Mg than Ca with DSA_{ma} was determined. Free as well as amorphous Mn oxides have positive effects on a higher size classes of DSA_{ma} 5–1 mm. Total Mn and all its oxides positive correlated with WSA_{ma} in size class 2–1 mm.

soil aggregates, total and available nutrients, manganese oxides, long-term mineral fertilization

Pôdna štruktúra má nesmierne dôležitú, ale mnohokrát prehliadanú úlohu pri udržateľnej výrobe potravín a blahobyte spoločnosti. Pojem „pôdna štruktúra“ sa používa v súvislosti s usporiadaním pôdnych častíc (4). Základné častice piesku, prachu a hliny sú zvyčajne usporiadané do sekundárnych celkov nazývaných agregáty, ktoré sú považované za základnú jednotku štruktúry pedálnych pôd (24). Pôdna štruktúra predstavuje jednu zo základných fyzikálnych vlastností pôdy (16) a je jedným z najdôležitejších atribútov pôdnej úrodnosti, ktorá je ovplyvnená celým komplexom vonkajších a vnútorných faktorov, ale i ich vzájomných interakcií (14). Organická hmota, zrnitostné zloženie, ale i zastúpenie niektorých kationov zohrávajú pri formovaní a následne stabilizácii pôdnych agregátov významnú úlohu. Výrazne väčšie množstvo štúdií z kationov pôsobiacich na pôdnu štruktúru pripadá na Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Al³⁺ a Fe³⁺. Relatívne menej informácií na agregáciu pôdy je zachytených o vplyve Mn a jeho oxidov. Dôvodom môže byť skutočnosť, že napr. v porovnaní s Fe či Al oxidmi zastúpenie Mn a jeho oxidov v pôdach je spravidla o jeden až dva rády menšie (3). Aj z tohto dôvodu sa môže predpokladať, že oxidy Mn nemusia mať výraznejší efekt na štruktúru pôdy v porovnaní s oxidmi Fe, Al, resp. inými kationmi. Oxidy Mn sú však v pôdach prítomné jednak vo forme povlakov, jemnozrnných agregátov či väčších vyvrázaných novotvarov „Mn konkrécií“ (3). Oxidy Mn sú schopné pútať iné kationy a vytvárať slabšie väzby s organickými látkami (20). Z pohľadu zrnitostného zloženia, najmä vyšší podiel ílu má pozitívny efekt na stabilitu agregátov, kým na druhej strane vysoký obsah piesku ich stabilitu zásadne znižuje (9). Aj napriek slabšej agregáčnej schopnosti sú piesočnaté pôdy využívané v poľnohospodárskej výrobe v mnohých regiónoch sveta. Racionálne hnojenie týchto pôd je preto nevyhnutnou praxou a efekt aplikácie hnojív na týchto pôdach je mnohokrát zásadný. Vo všeobecnosti, aplikácia minerálnych hnojív, ale i ich kombinácia s organickým hnojením má potenciál zlepšiť štruktúru pôdy (12, 26).

Pred zadefinovaním cieľov tejto práce sme pracovali s hypotézami, že minerálne hnojenie piesočnatej pôdy nemusí nevyhnutne zvýšiť celkové obsahy niektorých makroživín, ale na druhej strane môže mať pozitívny efekt na ich prístupnosť, čo sa v konečnom dôsledku môže prejavovať i na lepšom štruktúrnom stave (H1). Taktiež dlhodobé minerálne hnojenie na piesočnatej pôde môže zvýšiť aktivitu oxidov Mn, ktorá sa prejaví priaznivejším štruktúrou pôdy (H2). Preto sa v tejto štúdii hodnotia a kvantifikujú (i.) účinky dlhodobej aplikácie minerálnych hnojív na štruktúru pôdy, zastúpenie celkových a prijateľných foriem vybraných makroživín a oxidov Mn, a (ii.) vzťahy medzi hodnotenými makroživinami, oxidmi Mn a štruktúrou pôdy pri dlhodobom hnojení piesočnatej pôdy.

Materiál a metodika

Štúdium bolo realizované na výskumnej stanici Miedniewice (z. š. 51° 85' 05", z. d. 20° 11' 22"), ktorá sa nachádza 3 km východne od mesta Skierniewice v Poľsku. Pokusná plocha má rovinný charakter s nadmorskou výškou 150 m. Územie patrí do mierneho klimatického pásma s priemernou ročnou teplotou 8,0 °C a priemerným ročným úhrnom zrážok 528 mm (údaje získané z výskumnej stanice). Na výskumnej ploche prevládajú plytké pôdy,

ktoré sú vytvorené na fluviglaciálnych pieskoch. Pôdy sú klasifikované ako Planosoli, ktoré majú v A horizonte kyslé pH, nízky obsah organického uhlíka a zrnitostne dominuje frakcia piesku (21).

Pôdne vzorky boli odobrané v roku 2017 z experimentu, ktorý bol založený v roku 1975 a od tohto obdobia sa tu nepretržite aplikovali minerálne hnojivá. Vzorky pôdy sa odoberali z nasledujúcich variantov:

1. žiadne hnojenie – kontrola,
2. NPK,
3. CaNPK.

Dusík bol aplikovaný ako síran amónny ($90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$), fosfor ako superfosfát ($26 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$) a draslík vo forme chloridu draselného ($91 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$). Vápnik bol aplikovaný raz za štyri roky v dávke $1,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ako CaO. Na výskumnej ploche sa pestovali čučoriedky a plocha sa intenzívne neobrábala.

Vzorky pôdy po vysušení boli rozdelené pomocou prístroja AS 200 Recht® na jednotlivé veľkostné triedy štruktúrnych agregátov, ktoré sa následne použili na stanovenie zastúpenia vodoodolných agregátov Bakšajovou metódou. Vo vzorkách pôdy boli stanovené obsahy celkového mangánu (Mn_t), ktoré boli analyzované po rozklade vzoriek pôdy so zmesou 40 % HF a 60 % HClO_4 pomocou atómovej emisnej spektrometrie s mikrovlne indukovanou plazmou (MP-AES) (Agilent 4100 MP-AES). Obsahy voľných oxidov Mn (Mn_d) boli stanovené po extrakcii metódou MP-AES podľa Mehra a Jackson (13). Obsahy amorfných oxidov mangánu (Mn_o) boli rovnako stanovené po extrakcii metódou MP-AES (25). Obsahy kryštalických oxidov mangánu (Mn_c) boli vypočítané, ako rozdiel medzi obsahmi voľných oxidov Mn a amorfných oxidov Mn. Celkové obsahy K, Ca a Mg sa analyzovali po rozklade spopolnených vzoriek lúčavkou kráľovskou pomocou AAS metódy (Perkin Elmer AA 2100). Obsahy prístupných foriem K, Ca a Mg boli stanovené vo výluhu Mehlich III metódou AAS (Perkin Elmer AA 2100).

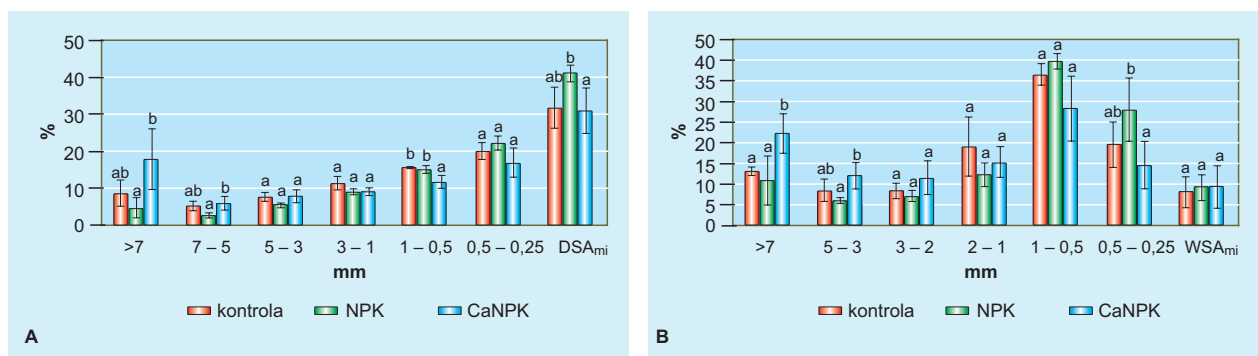
Efekty minerálneho hnojenia na sledované parametre boli posúdené pomocou jednofaktorovej analýzy rozptylu. Rozdiely medzi variantmi hnojenia boli posúdené LSD testom s minimálnou hladinou významnosti 95 %. Na zistenie vzájomných vzťahov medzi jednotlivými veľkostnými triedami štruktúrnych a vodoodolných agregátov a celkovými i prístupnými makroživinami, ale i jednotlivými oxidmi Mn bola použitá regresná analýza.

Výsledky a diskusia

Minerálne hnojivá sú významným zdrojom živín, ktoré sa prostredníctvom aktivity pôdneho zooloofaunu môžu významne podieľať na produkcii väčšieho množstva nadzemnej, ale i podzemnej biomasy, čo v konečnom dôsledku vedie k nárastu pôdneho organického uhlíka (19). Vyšší obsah pôdneho organického uhlíka je spájaný s lepšou agregáciou a tvorbou optimálnej pôdnej štruktúry (15). Vyššie uvedené (vyšší obsah SOC v dôsledku minerálneho hnojenia) na tomto experimente už bolo potvrdené (21). Pôdny organický uhlík je jedným z najvýznamnejších pedogénnych faktorov ovplyvňujúcich tvorbu a stabilitu pôdnych agregátov ako základnej pôdnej jednotky (15, 17) zvlášť na piesočnatých pôdach. Štyridsať jeden rokov kontinuálnej aplikácie priemyselných hnojív sa odrazilo na zmenách pôdnych vlastností, vrátane prerozdelenia zastúpenia jednotlivých veľkostných tried štruktúrnych (DSA), ale i vodoodolných (WSA) agregátov. Obsah veľkostnej triedy 1 – 0,5 mm štruktúrnych makro-agregátov (DSA_{ma}) vo variante CaNPK sa štatisticky významne znížil o 26 % a 24 % v porovnaní s nehnojenu kontrolou a variantom NPK (obrázok 1A). V dôsledku hnojenia v porovnaní s kontrolou v rámci ostatných veľkostných tried DSA neboli zistené významné rozdiely. Štatisticky významné zmeny však boli zistené medzi variantmi NPK a CaNPK a to vo veľkostných triedach $\text{DSA}_{ma} > 7 \text{ mm}$, $\text{DSA}_{ma} 7 - 5 \text{ mm}$ a DSA_{mi} . Aplikácia CaO vo variante CaNPK významne zvýšila obsahy väčších veľkostných tried DSA_{ma} a na druhej strane znížila obsahy štruktúrnych mikro-agregátov v porovnaní s aplikáciou iba NPK hnojív. Aplikácia CaO mala pozitívny efekt na zvýšenie obsahov väčších veľkostných tried ($> 5 \text{ mm}$ a $5 - 3 \text{ mm}$) vodoodolných makro-agregátov (WSA_{ma}). Obsah vodoodolných mikro-agregátov (WSA_{mi}) a menších veľkostných tried makro-agregátov nebol štatisticky zmenený v dôsledku nepretržitej 41-ročnej aplikácie priemyselných hnojív na piesočnatej pôde (obrázok 1B). Vápnik je mimoriadne dôležitý z hľadiska formovania a stability pôdnych agregátov (7), keďže je priamym aktérom známeho mechanizmu tvorby agregátov, a to: $\text{SOC} - \text{Ca} - \text{anorganická častica}$ (1).

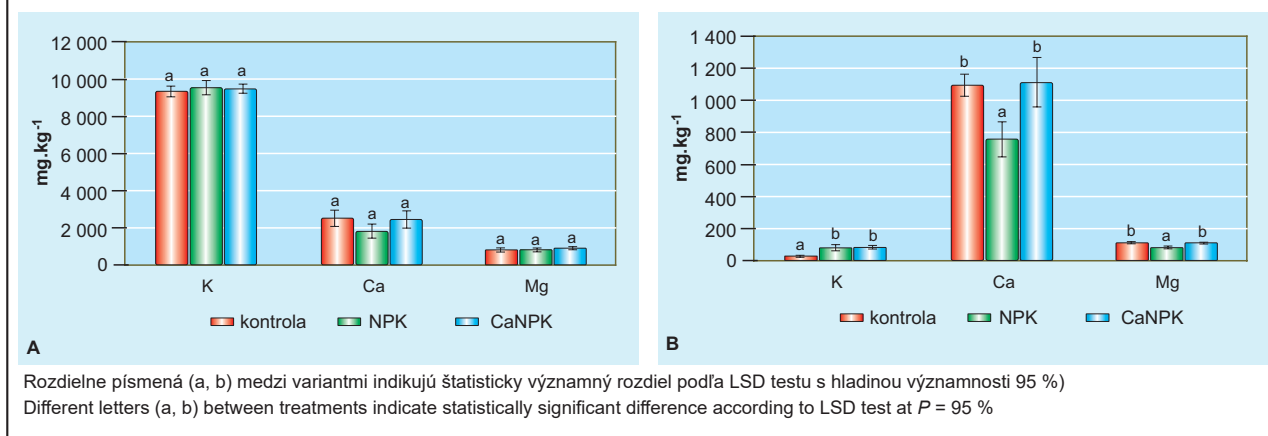
Katióny, ako napr. Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , ale i Fe^{3+} môžu mať významný vplyv na pôdnu štruktúru (1, 22) a tak sme zisťovali či v dôsledku dlhodobého používania minerálnych hnojív nastali zmeny v ich obsahoch v piesočnatej

Obrázok 1: Zastúpenie jednotlivých veľkostných tried A) štruktúrnych agregátov a B) vodoodolných agregátov
Figure 1: Contents of individual size classes A) dry-sieved aggregates, and B) water-stable aggregates



Rozdielne písmená (a, b) medzi variantmi indikujú štatisticky významný rozdiel podľa LSD testu s hladinou významnosti 95 %
 Different letters (a, b) between treatments indicate statistically significant difference according to LSD test at $P = 95 \%$

Obrázok 2: Zastúpenie A) celkových a B) prístupných obsahov K, Ca a Mg
Figure 2: Contents of A) total and B) available K, Ca and Mg



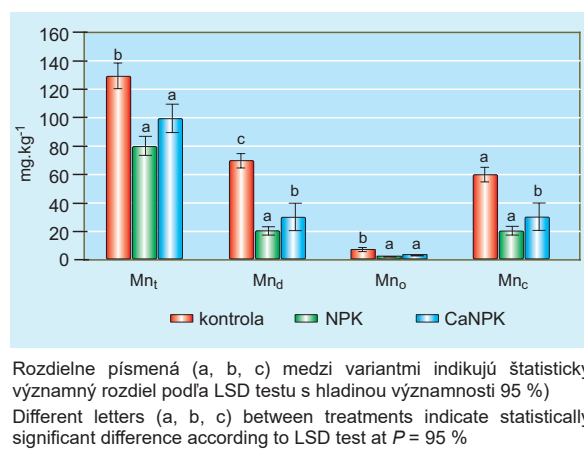
pôde. Z hľadiska množstva zastúpenia jednotlivých prvkov v Zemskej kôre pripadá obsahu K (2,46 %) siedme miesto (23). O obsahu K v pôdach rozhoduje množstvo organickej hmoty, ale i zrnitostné zloženie pôd. V piesočnatých pôdach je priemerný obsah K 0,7 % (8). V našom prípade (od 1976 do 2017), každoročná aplikácia 91 kg.ha⁻¹ K₂O vo variantoch NPK a CaNPK nemala štatisticky významný efekt na zvýšenie celkového obsahu K v piesočnatej pôde (obrázok 2A), ale štatisticky významne zvýšila jeho prijateľnosť z 28,9 mg.kg⁻¹ (kontrola) na 78,7 mg.kg⁻¹ v NPK a na 81,8 mg.kg⁻¹ v CaNPK variante (obrázok 2B). Hodnoty celkového Ca v kontrole, v NPK a v CaNPK variante boli 2,52 g.kg⁻¹, 1,77 g.kg⁻¹ a 2,42 g.kg⁻¹ a štatisticky sa medzi variantmi neodlišovali. Taktiež aj obsahy celkového Mg v závislosti od aplikácie minerálneho hnojenia neboli štatisticky významne zmenené. V dôsledku aplikácie NPK hnojenia počas sledovaného obdobia sa obsahy Ca, ale i Mg znížili o 31 % a 27 % v porovnaní s nehnojou kontrolou. Medzi nehnojou kontrolou a variantom CaNPK nebola zistená štatisticky významná zmena v obsahoch prístupného Ca a Mg (obrázok 2B). V NPK variantoch sa N aplikoval ako síran amónny, ktorý pôsobí fyziologicky kyslo (27) a keďže skúmaná piesočnatá pôda mala nízky obsah Ca a organickej hmoty (21) odrazilo sa to aj na nízkej pufráčnej schopnosti pôdy a v tomto variante tak dochádzalo k výraznejšej acidifikácii spojenjej s vyplavovaním Ca a Mg (6), ale i k intenzívnejšiemu odberu týchto prijateľných živín úrodou pestovaných čučoriedok.

Ako sme naznačili už v úvode, menej informácií v súvislosti s pôdnou štruktúrou je jej prepojenosť na obsah Mn a jeho oxidov. Z toho dôvodu sme v prvom rade posúdili efekt dlhodobého hnojenia na zmeny v obsahoch celkového Mn a jeho oxidov. Kováčik (8) uviedol, že obsah mangánu v pôdach je vysoký a pohybuje sa v intervale 100 až 3 000 mg.kg⁻¹ s priemerom okolo 450 mg.kg⁻¹. Obrázok 3 dokumentuje priemerné obsahy rôznych foriem oxidov mangánu v pôde v závislosti od aplikácie minerálnych hnojív po 41-rokoch ich aplikácie. Obsahy celkového Mn (Mn_t) sa pohybovali v rozpätí od 0,078 do 0,140 g.kg⁻¹ pôdy a získané výsledky poukazujú na skutočnosť, že hnojenie malo štatisticky významný ($P = 0,0029$) vplyv na zastúpenie Mn_t v pôde. Hodnoty Mn_t boli o 39 % a o 33 % menšie v NPK a CaNPK variantoch ako v kontrole. Obsahy voľných oxidov Mn (Mnd) kolísali v rozpätí od 0,013 g.kg⁻¹ do 0,077 g.kg⁻¹ pôdy a významne sa ni-

žovali v dôsledku aplikácie NPK, ale i v CaNPK variante. V dôsledku aplikácie minerálnych hnojív za sledované obdobie sa obsah Mnd (obsah amorfných oxidov Mn) priemerne znížil o 71 % v NPK a o 57 % v CaNPK v porovnaní s nehnojou kontrolou. V dôsledku aplikácie NPK, ale i CaNPK v porovnaní s kontrolou bol zaznamenaný štatisticky významný pokles v obsahoch kryštalických oxidov Mn (Mn_c). Obsah Mn sa v pôde zvyšuje v súvislosti s vápnením, prostredníctvom, ktorého sa zvyšuje pH pôdy čo má za následok znižovanie prístupnosti Mn a jeho akumuláciu (20). Na druhej strane aplikácia N v podobe síranu amónneho znižuje pH pôdy (5), čoho výsledkom je vylúhovanie Mn z pôdy, a to najmä vo variantoch s minerálnym hnojením.

Vplyv K na pôdnu štruktúru je najmenej jasný s pomedzi základných bázičných katiónov. Sú publikované údaje, ktoré ho považujú za škodlivý katión rovnako ako sodík (18), ale aj údaje, ktoré ho nepovažujú za škodlivý. Napríklad Levy a Torrento (10) publikovali, že výmenný draslík nie je škodlivý katión, pretože obmedzuje rozptyľovanie ílu a podieľa sa na udržiavaní stability makro-agregátov. Títo autori to vysvetľujú nižšou hydratačnou energiou adsorbovanou draslíkom, ktorá je o 72 % menšia ako v prí-

Obrázok 3: Zastúpenie celkového obsahu Mn a jeho oxidov
Figure 3: Contents of total Mn and its oxides



Tabuľka 1: Korelácie medzi jednotlivými veľkostnými triedami štruktúrnych, vodoodolných agregátmi a obsahmi K, Ca, Mg a oxidmi Mn

Table 1: Correlation coefficients between individual size classes of dry-sieved, water-stable aggregates and contents of K, Ca, Mg as well as Mn oxides

	Celkové (1)			Prístupné (2)			Mn			
	K (3)	Ca (4)	Mg (5)	K	Ca	Mg	Mn _i (6)	Mn _d (7)	Mn _o (8)	Mn _{kr} (9)
DSA _{ma} (10)	0,277	0,727*	0,742*	-0,160	0,678*	0,822**	0,380	0,559	0,466	0,569
DSA _{mi} (11)	-0,277	-0,727*	-0,742*	0,160	-0,678*	-0,822**	-0,380	-0,559	-0,466	-0,569
>7	0,339	0,569	0,742*	0,300	0,522	0,642	-0,089	0,131	0,039	0,141
>5	0,186	0,757*	0,764*	-0,052	0,751*	0,846**	0,317	0,508	0,415	0,518
>3	0,053	0,626*	0,507	-0,158	0,831**	0,788**	0,551	0,669*	0,597	0,677*
>1	0,079	0,330	0,284	-0,619	0,287	0,421	0,655	0,696*	0,624	0,703*
>0,5	-0,075	-0,271	-0,473	-0,547	-0,339	-0,350	0,401	0,192	0,253	0,185
>0,25	-0,328	-0,542	-0,689*	-0,227	-0,561	-0,635	-0,068	-0,250	-0,150	-0,261
WSA _{ma} (12)	0,253	0,182	-0,133	-0,146	-0,131	-0,015	-0,001	0,062	0,105	0,057
WSA _{mi} (13)	-0,253	-0,182	0,133	0,146	0,131	0,015	0,001	-0,062	-0,105	-0,057
>5	-0,225	-0,031	-0,091	-0,024	0,169	-0,568	-0,228	-0,031	-0,091	-0,024
>3	-0,142	0,620	0,385	0,195	0,673*	0,576	0,056	0,247	0,236	0,248
>2	0,011	0,677*	0,483	0,332	0,630	0,495	0,068	0,202	0,169	0,206
>1	-0,038	0,420	-0,132	-0,329	0,572	0,395	0,668*	0,679*	0,713*	0,675*
>0,5	0,024	-0,600	-0,526	-0,319	-0,708*	-0,598	-0,039	-0,192	-0,161	-0,195
>0,25	-0,117	-0,605	-0,334	-0,107	-0,724*	-0,652	-0,265	-0,409	-0,371	-0,413

DSA_{ma} – obsah štruktúrnych makro-agregátov, DSA_{mi} – obsah štruktúrnych mikro-agregátov, WSA_{ma} – obsah vodoodolných makro-agregátov, WSA_{mi} – obsah vodoodolných mikro-agregátov, Fe_t – obsah celkového železa, Fe_d – obsah voľných oxidov železa, Fe_o – obsah amorfných oxidov železa, Fe_c – obsah kryštalických oxidov železa

(1) total, (2) available, (3) potassium, (4) calcium, (5) magnesium, (6) total manganese content, (7) free manganese oxides, (8) amorphous manganese oxides, (9) crystalline manganese oxides, (10) content of dry-sieved macro-aggregates, (11) content of dry-sieved micro-aggregates, (12) content of water-stable macro-aggregates, (13) content of water-stable micro-aggregates, *P ≤ 0,05; ** P ≤ 0,01

pade sodíka. Na druhej strane Levy a Van der Watt (11) pozorovali iba prechodný efekt draslíka, vápnika a sodíka na disperziu ílu. Naše výsledky v 41-ročnom experimente s minerálnym hnojením na piesočnatej pôde poukázali na to, že ani celkový a ani prístupný K nemal žiadny významný efekt na tvorbu štruktúrnych a ani vodoodolných agregátov (Tabuľka 1). Obsahy celkového, ale i prístupného Ca mali priaznivý efekt na obsah DSA_{ma} zvlášť na veľkostné triedy 3 – 5 a 5 – 7 mm (Tabuľka 1). Tiež aj obsahy celkového a prístupného Mg mali pozitívny vplyv na obsah DSA_{ma} najmä väčších ako 5 mm. Obsah celkového Ca pozitívne koreloval s WSA_{ma} 2 – 3 mm, kým obsah prístupného Ca pozitívne koreloval s WSA_{ma} 3 – 5 mm. Tieto výsledky potvrdzujú efekt Ca, ale i Mg na tvorbu a stabilizáciu pôdnych makroagregátov (1). Zaujímavé však je, že silnejšie korelačné vzťahy boli medzi Mg a DSA ako Ca a DSA. Vo všeobecnosti Ca²⁺ ióny sú efektívnejšie ako Mg²⁺ v agregáčnom procese (2, 27). Voľné a amorfné oxidy Mn pozitívne korelovali s obsahom DSA_{ma} 1 – 5 mm, pričom celkový obsah Mn a všetky jeho sledované oxidy mali pozitívny efekt na zvýšenie zastúpenia veľkostných tried WSA_{ma} 1 – 2 mm (Tabuľka 1).

Záver

Získané výsledky poukázali na skutočnosť, že štyridsať jeden ročná kontinuálna aplikácia priemyselných hnojív mala výrazný vplyv na prerozdelenie zastúpenia jednotlivých veľkostných tried štruktúrnych, ale i vodoodolných agregátov. Najmä, v štvorročných cykloch aplikovaná dávka 1,6 t.ha⁻¹ CaO v kombinácii s NPK hnojením významne zvýšila obsahy väčších veľkostných tried štruktúrnych

makro-agregátov, avšak na druhej strane znížila obsahy štruktúrnych mikro-agregátov v porovnaní s aplikáciou iba NPK hnojív. Aplikácia CaO spolu s NPK mala pozitívny efekt na zvýšenie obsahov väčších veľkostných tried i vodoodolných makro-agregátov. Dlhodobá aplikácia NPK, ale i CaNPK štatisticky významne zvýšila obsah prístupného K, na druhej strane, obsah prístupného Ca a Mg sa výrazne znížil v dôsledku dlhodobej aplikácie iba NPK hnojív v piesočnatej pôde. Obsahy celkového Mn, ale i jeho oxidy sa významne znížili v dôsledku dlhodobej aplikácie priemyselných hnojív. Vyššie obsahy celkového, ale i prístupného Ca a Mg mali priaznivý efekt na zvyšovanie zastúpenia väčších veľkostných tried štruktúrnych makro-agregátov, pričom prekvapujúco intenzívnejší efekt na tvorbu makro-agregátov mal Mg ako Ca. Uvedené výsledky poukazujú tiež na skutočnosť, že v 41-ročnom experimente s minerálnym hnojením majú významný vplyv na agregáciu najmä väčších veľkostných tried štruktúrnych makro-agregátov, ale aj vodoodolných makro-agregátov s veľkosťou 1 – 2 mm oxidy mangánu.

Literatúra

- (1) BRONICK, C. J. – LAL, R. 2005. Soil structure and management: a review. In Geoderma, vol. 124, 2005, pp. 3–22.
- (2) CURTIN, D. – STEPPUHN, H. – SELLES, F. 1994. Effects of magnesium on cation selectivity and structural stability of sodic soils. In Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 58, 1994, pp. 730–737.
- (3) DIXON, J. B. – WHITE, N. 2002. Manganese oxides. In: Soil Mineralogy with Environmental Applications. DIXON, J.B. – SCHULZE, D.G. editors. SSSA Book Series, Madison, Wisconsin, USA, 2002, pp. 323–366.

- (4) FOTH, H.D. 1990. Fundamentals of soil science. 8th ed., New York : John Wiley & Sons, Inc., 1990, 360 p. ISBN 0-471-52279-1.
- (5) GE, S. – ZHU, Z. – JIANG, Y. 2018. Long-term impact of fertilization on soil pH and fertility in an apple production system. In *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, vol. 18, 2018, pp. 282–293
- (6) GRAHAM, M. H. – HAYNES, R. J. – MEYER, J. H. 2002. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. In *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 34, 2002, pp. 93–102.
- (7) KOBIERSKI, M. – KONDRATOWICZ-MACIEJEWSKA, K. – BANACH-SZOTT, M. – WOJEWÓDZKI, P. – CASTEJÓN, J. M. P. 2018. Humic substances and aggregate stability in rhizospheric and non-rhizospheric soil. In *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, 2018, pp. 2777–2789.
- (8) KOVÁČIK, P. 2014. Princípy a spôsoby výživy rastlín. Nitra : SPU, 2014, 278 s. ISBN 978-80-552-1193-0.
- (9) LEVY, G. J. – MILLER, W. P. 1997. Aggregate stabilities of some southeastern U.S. soils. In *Soil Science Society of America Journal*, vol. 61, 1997, pp. 1176–1182.
- (10) LEVY, G. J. – TORRENTO, J. R. 1995. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. In *Soil Sci.*, vol. 160, 1995, pp. 352–358.
- (11) LEVY, G. J. – VAN DER WATT, H. V. H. 1990. Effect of exchangeable potassium on the hydraulic conductivity and infiltration rate of some South African soils. In *Soil Sci.*, vol. 149, 1990, pp. 69–77.
- (12) LUGATO, E. – SIMONETTI, G. – MORARI, F. – NARDI, S. – BERTI, A. – GIARDINI, L. 2010. Distribution of organic and humic carbon in wet-sieved aggregates of different soils under long-term fertilization experiment. In *Geoderma*, vol. 157, 2010, pp. 80–85.
- (13) MEHRA, O. – JACKSON, J. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In *Clay and Clays Minerals*, vol. 5, 1960, pp. 317–327.
- (14) MOHAMMED, K. A. – HIRNAS, D. R. – NEMES, A. – GIMÉNEZ, D. 2020. Exogenous and endogenous controls on the development of soil structure. In *Geoderma*, vol. 357, 2020, pp. 1–18.
- (15) NOUWAKPO, S. K. – SONG, J. – GONZALEZ, J. M. 2018. Soil structural stability assessment with the fluidized bed, aggregate stability, and rainfall simulation on long-term tillage and crop rotation systems. In *Soil and Tillage Research*, vol. 178, 2018, pp. 65–71.
- (16) PIRES, L. P. – BORGES, J. A. – COOPER, M. – KOSA, J. A. – HECK, R. J. 2017. Soil structure changes induced by tillage systems. In *Soil and Tillage Research*, vol. 165, 2017, pp. 66–79.
- (17) POLLÁKOVÁ, N. – ŠIMANSKÝ, V. – KRAVKA, M. 2018. The influence of soil organic matter fractions on aggregates stabilization in agricultural and forest soils of selected Slovak and Czech hilly lands. In *Journal of Soils and Sediments*, vol. 18, 2018, pp. 2790–2800.
- (18) QUIRK, J. P. – SCHOFIELD, R. K. 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. In *J. Soil Sci.*, vol. 6, 1955, pp. 165–178.
- (19) RAHMAN, M. T. – ZHU, Q. H. – ZHOU, H. – PENG, X. 2017. The roles of organic amendments and microbial community in the improvement of soil structure of a Vertisol. In *Appl. Soil Ecol.*, vol. 111, 2017, pp. 84–93.
- (20) SUDA, A. – MAKINO, T. 2016. Functional effects of manganese and iron oxides on the dynamics of trace elements in soils with a special focus on arsenic and cadmium: A review. In *Geoderma*, vol. 270, 2016, pp. 68–75.
- (21) ŠIMANSKÝ, V. – JURIGA, M. – JONCZAK, J. – UZAROWICZ, L. – STAPIEŃ, W. 2019. How relationships between soil organic matter parameters and soil structure characteristics are affected by the long-term fertilization of a sandy soil. In *Geoderma*, vol. 342, 2019, pp. 75–84.
- (22) ŠIMANSKÝ, V. – KOLENČÍK, M. – PUŠKELOVÁ, L. 2014. Effects of carbonates and bivalent cations and their relationships with soil organic matter from the view point of aggregate formation. In *Agriculture (Poľnohospodárstvo)*, vol. 60, 2014, pp. 77–86.
- (23) ŠIMANSKÝ, V. – POLLÁKOVÁ, N. – CHLPÍK, J. – KOLENČÍK, M. 2018. Pôdoznalectvo. Nitra : SPU, 2018, 399 s. ISBN 978-80-552-1878-6.
- (24) TATE, R. L. 1995. Soil microbiology. New York : John Wiley and Sons, 1995, 398 p. ISBN 0-471-57868-1.
- (25) VAN REEUWIJK L. 1995. Procedures for soil analysis. Technical Paper 9. International Soil Reference and Information Centre, 1995.
- (26) WEI, X. – WANG, X. – MA, T. – HUANG, L. – PU, Q. – HAO, M. – ZHANG, X. 2017. Distribution and mineralization of organic carbon and nitrogen in forest soils of the southern Tibetan Plateau. In *Catena*, vol. 156, 2017, pp. 298–304.
- (27) ZHANG, S. – ZHANG, B. – LI, X. 2002. Evolution of soil fertility and fertilizer benefits under different soil types and cropping systems. In *Plant Nutrition Fertilization Science*, vol. 8, 2002, pp. 9–15.
- (28) ZHANG, X. C. – NORTON, L. D. 2002. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. In *J. Hydrol.*, vol. 260, 2002, pp. 194–205.

doc. Ing. Vladimír Šimanský, PhD.
Katedra pedológie a geológie
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre
Fakulta agrobiológie a potravinových zdrojov
Trieda Andreja Hlinku 2, 949 76 Nitra
e-mail: Vladimir.Simansky@uniag.sk



ilustračné foto