

Marzena S. Brodowska

**Wpływ nawożenia siarką na zawartość azotu w roślinach  
w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia gleby w wapń i magnez**

The effect of sulphur fertilization on the content of nitrogen in plants in the conditions  
of differentiated soil supply with calcium and magnesium

ABSTRACT. In a the two-year pot experiment the range and direction of the changes in total nitrogen and protein nitrogen content in spring forms of wheat and rape in the conditions of sulphur fertilization ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , elementary S) and liming ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ ) were analysed. The material was taken from the arable layer of grey-brown podzolic sandy loam soil. The soil before the experiment was characterised by the following properties: soil  $\text{pH}_{\text{KCl}} - 4.9$ , the mean content of available potassium, magnesium and sulphate sulphur and high content of available phosphorus. The experiments were performed using the complete randomization metod. Three variable factor were used – the dose and form of lime and the dose of sulphur were applied on 3 levels, while sulphur form on 2 levels. The harvest took place at the tillering stage (spring wheat) and at the rosette stage (spring rape) and at the stages of flowering and full maturity. The analysis of the results indicates that the application of sulphur and the plant harvesting stage had the most significant influence on the content of the analysed forms of nitrogen. In the experiment the highest values of total nitrogen were obtained in the plants harvested at the first stage of development (tillering, rosette). Fertilization with sulphur in most analysed treatments caused the increase of total nitrogen in the case of spring wheat and the decrease of total nitrogen in the case of spring rape. The application of both forms of sulphur beneficially affected the metabolism of nitrogen components. It may be concluded taking into account an increased the quantity of protein nitrogen in the generative organs of spring forms of wheat and rape.

KEY WORDS: total nitrogen, protein nitrogen, wheat, oilseed rape, sulphur fertilization, liming

Jednym z niezbędnych składników pokarmowych dla roślin jest siarka [McGrath, Zhao 1995; Zhao i in. 1995]. Wpływa ona na poprawę plonowania i jakość produktów roślinnych, a także zwiększa tolerancję roślin na stresy biotyczne i abiotyczne [Terelak i in. 1995; Jain, Gupta 1996; Peacock i in. 1996; Brown i in. 1997; Zhao i in. 1997; Kiepuł 1998; Motowicka-Terelak, Terelak 2000]. Na podstawie składu chemicznego roślin stwierdzono, że siarka jest piątym lub szóstym pierwiastkiem po węglu, wodrze, tlenie i azocie, a jej udział zbliżony jest do fosforu [Dojka i in. 1994; Motowicka-Terelak, Terelak 2000; Scherer 2001].

Znaczenie siarki w prawidłowym wzroście i rozwoju roślin jest wszechstronne, ale najważniejsza rola wynika z występowania tego składnika w większości białek. Wchodzi ona w skład aminokwasów egzogennych niezbędnych do ich syntezy, tj. cystyny, cysteiny i metioniny. Aminokwasy zawierające siarkę uczestniczą w utrzymaniu struktury dwu-, trój- i czterorzędowej białek, tworząc wiązania dwusiarczkowe [Wrigley i in. 1984; McDowell 1992; Hell 1997; Hlušek i in. 1999; Scherer 2001]. Optymalne zaopatrzenie roślin uprawnych w siarkę ma także znaczenie ekologiczne, gdyż jej niedobór prowadzi do zmniejszenia wykorzystania azotu z nawozów, co może być zagrożeniem dla środowiska naturalnego [Gryffiths i in. 1995; Terelak i in. 1995; Withers i in. 1997; Jackson 2000].

Celem przeprowadzonych badań było ustalenie zakresu wpływu nawożenia siarką oraz wapnowania na zmiany w zawartości azotu ogólnego i białkowego w częściach wegetatywnych i generatywnych jarych form pszenicy i rzepaku.

#### METODY

Badania oparto na analizie prób roślinnych uzyskanych z dwuletniego doświadczenia wazonowego, założonego na materiale glebowym pobranym z warstwy ornej gleby płowej o składzie granulometrycznym gliny piaszczystej. Gleba przed rozpoczęciem doświadczenia cechowała się następującymi właściwościami: kwaśnym odczynem ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$  4,9), średnią zawartością przyswajalnego potasu ( $178,3 \text{ mg K kg}^{-1}$ ), magnezu ( $46,0 \text{ mg Mg kg}^{-1}$ ) i siarki siarczanowej ( $25,0 \text{ mg S kg}^{-1}$ ), wysoką zawartością przyswajalnego fosforu ( $87,7 \text{ mg P kg}^{-1}$ ) oraz zawierała 2,13% C org.

W pierwszym roku badań rośliną testową była pszenica jara odmiany Ismena, a w drugim rzepak jary odmiany Licosmos „00”. W doświadczeniach czynnikami zmiennymi były dawka siarki, forma siarki oraz dawka i forma nawozu odkwaszającego. Eksperyment założono metodą kompletnej randomizacji według następującego schematu: 1.  $\text{S}_0\text{Ca}_0\text{Mg}_0$ ; 2.  $\text{S}_1\text{Ca}_0\text{Mg}_0$ ; 3.  $\text{S}_2\text{Ca}_0\text{Mg}_0$ ; 4.  $\text{S}_0\text{Ca}_1\text{Mg}_1$ ; 5.  $\text{S}_1\text{Ca}_1\text{Mg}_1$ ; 6.  $\text{S}_2\text{Ca}_1\text{Mg}_1$ ; 7.  $\text{S}_0\text{Ca}_2\text{Mg}_0$ ; 8.  $\text{S}_1\text{Ca}_2\text{Mg}_0$ ; 9.  $\text{S}_2\text{Ca}_2\text{Mg}_0$ ;

gdzie:  $S_0$  – bez nawożenia siarką;  $S_1$  – nawożenie S w postaci  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  lub S elementarnej w ilości  $0,015 \text{ g S kg}^{-1}$  gleby pod pszenicę jary i w ilości  $0,03 \text{ g S kg}^{-1}$  gleby pod rzepak jary;  $S_2$  – nawożenie S w postaci  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  lub S elementarnej w ilości  $0,03 \text{ g S kg}^{-1}$  gleby pod pszenicę jary i w ilości  $0,06 \text{ g S kg}^{-1}$  gleby pod rzepak jary;  $\text{Ca}_0\text{Mg}_0$  – bez wapnowania;  $\text{Ca}_1\text{Mg}_1$  – wapnowanie mieszaniną  $\text{CaCO}_3$  i  $\text{MgCO}_3$  (dolomit) według  $1,0 \text{ Hh} - 1,226 \text{ g CaO kg}^{-1}$  gleby ( $1,095 \text{ g CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$  i  $0,920 \text{ g MgCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ );  $\text{Ca}_2\text{Mg}_0$  – wapnowanie  $\text{CaCO}_3$  według  $1,0 \text{ Hh} - 1,226 \text{ g CaO kg}^{-1}$  gleby ( $2,190 \text{ g CaCO}_3 \text{ kg}^{-1}$ ).

Wapnowanie zastosowano jednorazowo przed założeniem doświadczenia, a nawożenie siarką zastosowano przed siewem pszenicy i rzepaku. Pod wszystkie obiekty doświadczalne zastosowano stałe nawożenie NPK w ilościach dostosowanych do potrzeb pokarmowych pszenicy i rzepaku. Rośliny zbierano w fazie krzewienia (w przypadku rzepaku w okresie wytworzenia rozety – 8 liści), kwitnienia i pełnej dojrzałości. Po zbiorze rośliny mineralizowano w stężonym kwasie siarkowym z dodatkiem 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ . W materiale tym w średnich próbach obiektowych zawartość azotu ogólnego oznaczono metodą Kjeldahla. W ziarnie pszenicy i w nasionach rzepaku dokonano oznaczeń azotu białkowego metodą destylacji po ekstrakcji na gorąco kwasem trichlorooctowym.

#### WYNIKI

Zawartość azotu ogólnego w suchej masie pszenicy zbieranej w fazie krzewienia kształtowała się, w zależności od obiektu doświadczalnego, w granicach 3,00–3,61% N (tab. 1). W okresie kwitnienia wystąpiło prawie dwukrotne zmniejszenie ilości tego pierwiastka (1,40–1,93% N). W obrębie analizowanych faz zróżnicowanie w ilości azotu ogólnego wynikało głównie z formy i dawki siarki. Forma nawozu odkwaszającego tylko w niewielkim stopniu przyczyniła się do zmian w zawartości analizowanego pierwiastka.

Nawożenie siarką – podobnie jak w badaniach innych autorów [Uziak, Szymańska 1987] – wiązało się ze wzrostem N-ogólnego w suchej masie roślin. W fazie krzewienia w obiektach nawożonych siarką w ilości  $0,03 \text{ g S kg}^{-1}$  gleby ( $S_2$ ) zawartość azotu była wyższa o 12,1% procent w stosunku do jego ilości w pszenicy z serii  $S_0$ . W większości obiektów wyższą koncentracją azotu cechowały się rośliny nawożone siarką elementarną w porównaniu z zawartościami stwierdzonymi w pszenicy nawożonej siarczanem sodu. W fazie kwitnienia stosowanie wyższej dawki siarki ( $S_2$ ) powodowało 9,4–15,9% (seria z  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) i 8,0–37,9% (seria z  $S_{\text{elementarna}}$ ) wzrost zawartości N-ogólnego w stosunku do wartości w roślinach, pod które nie stosowano nawożenia tym składnikiem ( $S_0$ ).

Tabela 1. Wpływ nawożenia siarką na zawartość azotu w pszenicy jarej w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia gleby w wapń i magnez

Table 1. The effect of sulphur fertilization on the content of nitrogen in spring wheat under conditions of varied soil supply with calcium and magnesium

Obiekt Treatment	Faza Stage				
	krzewienie tillering	kwitnienie flowering	ziarno grain		
	N-ogólny total N, % N			N białkowy Protein N, % N	(N białk./N og.) 100% (Prot. N/Tot. N) 100%
S w postaci Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Sulphur applied as Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					
S <sub>0</sub> Ca <sub>0</sub> Mg <sub>0</sub>	3,14	1,60	1,57	1,26	80,3
S <sub>1</sub> Ca <sub>0</sub> Mg <sub>0</sub>	3,15	1,66	1,61	1,28	79,5
S <sub>2</sub> Ca <sub>0</sub> Mg <sub>0</sub>	3,23	1,75	1,65	1,29	78,2
S <sub>0</sub> Ca <sub>1</sub> Mg <sub>1</sub>	3,25	1,76	1,56	1,27	81,4
S <sub>1</sub> Ca <sub>1</sub> Mg <sub>1</sub>	3,56	1,85	1,68	1,45	86,3
S <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> Mg <sub>1</sub>	3,61	1,93	1,76	1,54	87,5
S <sub>0</sub> Ca <sub>2</sub> Mg <sub>0</sub>	3,00	1,45	1,54	1,24	80,5
S <sub>1</sub> Ca <sub>2</sub> Mg <sub>0</sub>	3,39	1,65	1,61	1,37	85,1
S <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Mg <sub>0</sub>	3,53	1,68	1,67	1,39	83,2
S w postaci elementarnej Sulphur applied as elementary form					
S <sub>0</sub> Ca <sub>0</sub> Mg <sub>0</sub>	3,28	1,65	1,61	1,29	80,1
S <sub>1</sub> Ca <sub>0</sub> Mg <sub>0</sub>	3,50	1,71	1,71	1,31	76,6
S <sub>2</sub> Ca <sub>0</sub> Mg <sub>0</sub>	3,61	1,82	1,74	1,33	76,4
S <sub>0</sub> Ca <sub>1</sub> Mg <sub>1</sub>	3,26	1,76	1,60	1,29	80,6
S <sub>1</sub> Ca <sub>1</sub> Mg <sub>1</sub>	3,56	1,82	1,68	1,42	84,5
S <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> Mg <sub>1</sub>	3,60	1,90	1,71	1,47	86,0
S <sub>0</sub> Ca <sub>2</sub> Mg <sub>0</sub>	3,25	1,40	1,59	1,26	79,2
S <sub>1</sub> Ca <sub>2</sub> Mg <sub>0</sub>	3,42	1,82	1,71	1,34	78,4
S <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Mg <sub>0</sub>	3,58	1,93	1,74	1,36	78,2

W okresie pełnej dojrzałości zawartość azotu w ziarnie, w zależności od obiektu doświadczalnego, zawierała się w granicach 1,54–1,76%. Podobnie jak to było w poprzednich fazach rozwojowych najwyższymi zawartościami N-ogólnego cechowało się ziarno pszenicy pochodzącej z serii nawożonej wyższą dawką siarki (S<sub>2</sub>), w której stwierdzono 5,1–12,8% wzrost koncentracji analizowanego składnika w stosunku do jego zawartości w ziarnie z serii S<sub>0</sub>. Jak wskazują uzyskane dane, nieco wyższą koncentracją azotu ogólnego odznaczało się ziarno z serii nawożonej siarką elementarną w porównaniu z zawartościami stwierdzonymi w roślinach nawożonych siarczanem sodu. Wapnowanie dolomitami wiązało się ze wzrostem zawartości azotu w serii nawożonej siarczanem sodu. W przypadku obiektów z zastosowaną siarką elementarną najwyższą zawartość N-ogólnego charakteryzowała ziarno pszenicy z serii niewapnowanej i wapnowanej CaCO<sub>3</sub>.

Zastosowane czynniki doświadczalne wywarły także korzystny wpływ na przemiany azotu w roślinach. Wyraziło się to wzrostem ilości azotu białkowego w organach generatywnych roślin testowych. W konsekwencji rośliny z obiektów nawożonych siarką i wapnowanych odznaczały się najwyższym wykorzystaniem azotu do syntezy białka. Ograniczoną syntezę białek przy niedoborze siarki wykazano także w innych pracach [Uziak, Szymańska 1987; Motowicka-Terelak 1989]. Jak wykazują badania dotyczące roślin zbożowych, niedostateczne zaopatrzenie ich w siarkę, wpływając na zmniejszenie produkcji białka, powoduje m.in. pogorszenie jakości wypiekowej mąki [Byers i in. 1987; Hanelklaus i in. 1992; Zhao i in. 1995, 1997].

Korzystny wpływ nawożenia siarką i wapnowania na zawartość azotu białkowego w ziarnie pszenicy miał swoje odzwierciedlenie w uzyskanych wartościach procentowego stosunku  $N_{\text{białk.}} / N_{\text{og.}}$ . Najwyższe wartości tego stosunku stwierdzono w ziarnie pszenicy z serii wapnowanej dolomitem i nawożonej siarką. Stanowi to wyraźny dowód, iż zastosowane czynniki doświadczalne wpłynęły na wzrost włączania azotu pobranego przez roślinę w związki organiczne. Z danych literatury [Panak 1997; Ciećko, Wyszowski 1999] wynika, że synteza związków zawierających azot uzależniona jest również od zawartości magnezu. Przy słabym zaopatrzeniu roślin w magnez obniża się zawartość białka właściwego i relatywnie wzrasta ilość wolnych aminokwasów, amidów i azotu azotanowego. Synteza białek nie była więc hamowana w wyniku ograniczonej ilości aminokwasów, ale na skutek braku magnezu enzymy niezbędne do budowy białek nie były dostatecznie aktywowane.

W rzepaku zbieranym w fazie rozety zawartość azotu ogólnego – w zależności od obiektu doświadczalnego – zawierała się w przedziale 3,92–5,81% N (tab. 2). Do okresu kwitnienia rzepaku zawartość ta uległa prawie dwukrotnemu obniżeniu, przyjmując wartości w zakresie 2,07–3,33% N.

Zróznicowanie zawartości N-ogólnego wynikało głównie z nawożenia siarką, przy czym było ono uzależnione od fazy rozwojowej roślin oraz wapnowania gleby. W dwu pierwszych fazach rozwojowych rzepaku zastosowanie nawozów odkwaszających wyraźnie wpływało na spadek ilości N-ogólnego w roślinach. W zależności od obiektu doświadczalnego spadek ten wynosił od kilku do kilkudziesięciu procent w stosunku do zawartości analizowanej formy azotu w roślinach z serii bez nawozu odkwaszającego.

W fazie rozety najwyższą zawartość azotu ogólnego odnotowano w rzepaku z serii niewapnowanej i nienawożonej siarką ( $S_0Ca_0Mg_0$ ). Nawożenie siarką, w zależności od serii doświadczalnej, powodowało 1,2–7,5% obniżenie koncentracji N-ogólnego w roślinach z obiektów bez wapna, zaś w rzepaku z serii wapnowanej wpływało na 2,8–9,0% wzrost oznaczanej formy azotu. W okresie

kwitnienia lepsze zaopatrzenie roślin w siarkę wiązało się z 4,3–16,9-procentowym obniżeniem ilości azotu ogólnego w serii z  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , podczas gdy w serii z siarką elementarną w większości przypadków obserwowano 2,3–13,3% wzrost tej formy azotu w odniesieniu do wartości w obiektach bez nawożenia tym składnikiem.

Tabela 2. Wpływ nawożenia siarką na zawartość azotu w rzepaku jarym w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia gleby w wapń i magnez

Table 2. The effect of sulphur fertilization on the content of nitrogen in spring rape under conditions of varied soil supply with calcium and magnesium

Obiekt Treatment	Faza Stage				
	rozeta rosette	kwitnienie flowering	nasiona seeds		
	N-ogólny total N, % N			N białkowy protein N, % N	(N białk./N og.) 100% (Prot. N/Tot. N) 100%
S w postaci $\text{Na}_2\text{SO}_4$ Sulphur applied as $\text{Na}_2\text{SO}_4$					
$\text{S}_0\text{Ca}_0\text{Mg}_0$	5,81	3,22	3,42	x <sup>1</sup>	x
$\text{S}_1\text{Ca}_0\text{Mg}_0$	5,74	3,08	3,05	2,02	66,2
$\text{S}_2\text{Ca}_0\text{Mg}_0$	5,66	3,08	3,00	2,12	70,7
$\text{S}_0\text{Ca}_1\text{Mg}_1$	4,96	2,46	3,70	X	X
$\text{S}_1\text{Ca}_1\text{Mg}_1$	5,12	2,13	2,69	1,95	72,5
$\text{S}_2\text{Ca}_1\text{Mg}_1$	5,10	2,13	2,72	2,06	75,7
$\text{S}_0\text{Ca}_2\text{Mg}_0$	4,82	2,49	3,58	x	x
$\text{S}_1\text{Ca}_2\text{Mg}_0$	5,07	2,07	2,52	1,77	70,2
$\text{S}_2\text{Ca}_2\text{Mg}_0$	5,07	2,24	2,58	1,88	72,9
S w postaci elementarnej Sulphur applied as elementary form					
$\text{S}_0\text{Ca}_0\text{Mg}_0$	5,60	2,94	3,47	x	x
$\text{S}_1\text{Ca}_0\text{Mg}_0$	5,40	3,16	2,88	2,21	76,74
$\text{S}_2\text{Ca}_0\text{Mg}_0$	5,18	3,33	2,94	2,29	77,89
$\text{S}_0\text{Ca}_1\text{Mg}_1$	4,31	2,27	4,26	x	x
$\text{S}_1\text{Ca}_1\text{Mg}_1$	3,92	2,35	2,55	1,95	76,47
$\text{S}_2\text{Ca}_1\text{Mg}_1$	4,51	2,24	2,52	2,00	79,37
$\text{S}_0\text{Ca}_2\text{Mg}_0$	4,23	2,16	3,86	x	x
$\text{S}_1\text{Ca}_2\text{Mg}_0$	4,40	2,32	2,63	1,95	74,14
$\text{S}_2\text{Ca}_2\text{Mg}_0$	4,48	2,21	2,52	1,97	78,17

<sup>1</sup>x – nie oznaczono ze względu na brak materiału; not determined because of material lack

Zawartość azotu ogólnego w nasionach rzepaku kształtowała się w granicach 2,52–4,26% N. Jak wynika z uzyskanych danych, wpływ czynników doświadczalnych na kształtowanie się ilości N-ogólnego w nasionach był analogiczny jak w materiale roślinnym zbieranym w fazie rozety i kwitnienia. W konsekwencji najniższe zawartości N-ogólnego odnotowano w roślinach z serii wapnowanej i nawożonej siarką.

Stosowanie obydwu form siarki oddziaływało korzystnie na przemiany metaboliczne związków azotu. Świadczy o tym zwiększona ilość azotu białkowego w nasionach rzepaku z serii nawożonej wyższą dawką siarki. Wzrost tej formy azotu przy wyższej dawce siarki ( $S_2$ ) był 1,0–6,2% w stosunku do wartości uzyskanych na poziomie  $S_1$ .

Dodatek siarki do gleby prowadził do znacznej poprawy metabolizmu azotu, co objawiało się między innymi niższą zawartością azotanów w ich organach [Wiśniowska-Kielian 1991]. W badaniach innych autorów [Rychlicka 1989; Marska, Wróbel 2000] stwierdzono, że u roślin narażonych na niedobór siarki wzrastała zawartość niebiałkowych związków azotowych, zaś w warunkach intensywnego nawożenia azotem niebiałkowe formy tego składnika mogą stanowić ponad 50% jego ogólnej zawartości. Zmniejszenie syntezy białek i pogorszenie ich jakości w roślinach wykazujących niedobór tego pierwiastka spowodowane jest zakłóceniami w funkcjonowaniu enzymów związanych z redukcją azotanów oraz obniżeniem zawartości w roślinach aminokwasów egzogennych, głównie cysteiny i metioniny [Motowicka-Terelak, Terelak 1998].

Zastosowanie nawozów odkwaszających, w odróżnieniu od nawożenia siarką, obniżyło o kilkanaście procent zawartość azotu białkowego w nasionach w odniesieniu do wartości z obiektów bez wapna.

Uzyskane dane pozwalają na stwierdzenie, iż nawożenie siarką, jak i wapnowanie wpłynęły korzystnie na przemiany azotu w rzepaku jarym. Wyraziło się to najwyższymi wartościami stosunku  $N_{białk.} / N_{og.}$  w serii wapnowanej i nawożonej wyższą dawką siarki, co świadczy o największym wykorzystaniu azotu do syntezy białek w roślinach pochodzących z tych obiektów.

#### WNIOSKI

1. Zmiany zawartości azotu ogólnego w pszenicy i rzepaku zależały w największym stopniu od nawożenia siarką i okresu zbioru roślin. Najwyższe wartości N-ogólnego odnotowano w roślinach zbieranych na początku wegetacji (krzewienie, rozeta).

2. Nawożenie siarką w większości analizowanych obiektów wpłynęło na wzrost zawartości azotu ogólnego w pszenicy jarej oraz spadek w rzepaku jarym.

3. Nawożenie obiema formami siarki wpłynęło korzystnie na metabolizm azotu w roślinach. Świadczy o tym wzrost zawartości azotu białkowego w ich organach generatywnych i w konsekwencji zwiększenie wartości procentowego stosunku azotu białkowego do azotu ogólnego.

## PIŚMIENNICTWO

- Brown L., Scholefield D., Jawkes E.C., Preedy N. 1997. Incipient S deficiency in the grassland soils of south west England. *Fertilization for Sustainable Plant Production and Soil Fertility. 11<sup>th</sup> World Fertilizer Congress of CIEC, Gent*, 61–66.
- Byers M., Franklin J., Smith S.J. 1987. The nitrogen and sulphur nutrition of wheat and its effect on the composition and baking quality of the grain. *Aspects of Applied Biology* 15, 337–344.
- Ciećko Z., Wyszowski M. 1999. Wpływ nawożenia azotem, potasem i wapniem na zawartość i pobranie magnezu przez rzepak jary. *Biul. Magnezol.* 4, 1, 38–42.
- Dojka M., Krajewski J., Kmieć B., Dąbek M. 1994. Niektóre aspekty stosowania siarki do nawożenia gleb. *Chemik* 4, 100–103.
- Griffiths M.W., Kettlewell P.S., Hocking T.J. 1995. Effects of foliar-applied sulphur and nitrogen on grain growth, grain sulphur and nitrogen concentrations and yield of winter wheat. *J. Agric. Sci.* 125, 331–339.
- Haneklaus S., Evans E., Schnug E. 1992. Baking quality and sulphur content of wheat. I. Influence of grain sulphur and protein concentrations on loaf volume. *Sulphur in Agriculture* 16, 31–34.
- Hell R. 1997. Molecular physiology of plant sulphur metabolism. *Planta* 202, 138–148.
- Hlušek J., Richter R., Hřivna L. 1999. Yields and quality of onions fertilised with nitrogen and sulphur. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie* 349, *Mat. Konf. Nauk. nt. Ekologiczne i rolnicze uwarunkowania nawożenia.* 64, 121–125.
- Jackson G.D. 2000. Effects of nitrogen and sulphur on Canola yield and nutrient uptake. *Agron. J.* 92, 644–649.
- Jain D.K., Gupta A.K. 1996. Response of mustard to sulphur through gypsum. Recycling of plant nutrients from industrial processes. *10<sup>th</sup> International Symposium of CIEC, Gent*, 159–164.
- Kiepuł J. 1998. Wpływ symulowanej imisji i wapnowania na bilans siarki w doświadczeniu lizymetrycznym. *Fragm. Agron.* 2, 45–52.
- Marska E., Wróbel J. 2000. Znaczenie siarki dla roślin uprawnych. *Fol. Univ. Agric. Stetin.* 204, *Agricultura* 81, 69–76.
- McDowell L.R. 1992. *Minerals in animal and human nutrition.* Academic Press, Inc., London.
- McGrath S.P., Zhao F.J. 1995. A risk assessment of sulphur deficiency in cereals using soil and atmospheric deposition data. *Soil Use and Management* 11, 110–114.
- Motowicka-Terelak T. 1989. Badania modelowe nad mechanizmem i skutkami degradacji gleb zanieczyszczonych związkami siarki. Cz. I. Zmiany właściwości chemicznych gleby gliniastej w warunkach systematycznego zasiarczania. *Pam. Puł.* 94, 11–27.
- Motowicka-Terelak T., Terelak H. 1998. Siarka w glebach Polski – stan i zagrożenie. *Bibl. Monitoringu Środ.* Warszawa.
- Motowicka-Terelak T., Terelak H. 2000. Siarka w glebach i roślinach Polski. *Fol. Univ. Agric. Stetin.* 204, *Agricultura* 81, 7–16.
- Panak H. 1997. Znaczenie magnezu w żywieniu roślin. *Biul. Magnezol.* 2, 4, 232–238.
- Peacock S., Evans E.J., Monaghan J.D., Rimmer D.L. 1996. S uptake and yield responses of crops grown on a S-deficient soil amended with industrial co-product gypsum. Recycling of plant nutrients from industrial processes. *10<sup>th</sup> International Symposium of CIEC, Gent*, 237–242.
- Rychlicka W. 1989. Wpływ gleby i nawożenia na zawartość siarki w paszy łąkowej. *Wiad. Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych* 16, 2, 109–119.
- Scherer H. W. 2001. Sulphur in crop production – invited paper. *Europ. J. Agron.* 14, 81–111.



- Terelak H., Piotrowska M., Motowicka-Terelak T., Stuczyński T., Budzyńska K. 1995. Zawartość metali ciężkich i siarki w glebach użytków rolnych Polski oraz ich zanieczyszczenie tymi składnikami. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 418, 45–60.
- Uziak Z., Szymańska M. 1987. Wpływ siarki na skład chemiczny biomasy słonecznika i seradeli. *Pam. Puł.* 89, 131–141.
- Wiśniowska-Kielian B. 1991. Skład chemiczny roślin w zależności od kwasowości gleby. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie* 262 (34), 362–366.
- Withers P.J.A., Zhao F., McGrath S.P., Evans E.J., Sinclair A.H. 1997. Sulphur inputs for optimum yields of cereals, Optimising cereal inputs: Its scientific basis. *Aspects of Applied Biology* 50, 191–198.
- Wrigley C.W., Du Cros D.L., Moss H.J., Randall P.J., Fullington J.G., Kasarda D.D. 1984. Effect of sulphur deficiency on wheat quality. *Sulphur in Agriculture* 8, 2–7.
- Zhao F.J., McGrath S.P., Crosland A.R. 1995. Changes in the sulphur status of British wheat grain in the last decade, and its geographical distribution. *J. Sci. Food Agric.* 68, 507–514.
- Zhao F.J., Withers P.J.A., Evans E.J., Monaghan J., Salmon S.E., Shewry P.R., McGrath S.P. 1997. Sulphur nutrition: An important factor for the quality of wheat and rapeseed. *Plant nutrition – for sustainable food production and environment* Ando T. (Eds.) et al., Kluwer Academic Publishers, 917–922.

