

هم‌دماهای جذب سطحی بور در خاک: اثرات نسبت جذب سطحی سدیم (SAR)، pH محلول و قدرت یونی

مجتبی مقبلی¹ - محسن فرحبخش^{2*} - ناصر برومند³

تاریخ دریافت: 1393/07/08

تاریخ پذیرش: 1395/07/19

چکیده

فرآیندهای جذب سطحی و واجذب نقش تعیین‌کننده‌ای بر حلالیت بور در محلول خاک و در نتیجه در دسترس بودن آن برای گیاهان ایفا می‌کنند. قدرت یونی، pH و نوع یون‌های تبدالی خاک از جمله عوامل مهم بر جذب سطحی بور در خاک محسوب می‌شوند. به‌منظور ارزیابی اثر عوامل فوق بر قابلیت دسترسی بور، جذب سطحی بور در یک نمونه خاک آهکی به صورت پیمانه‌ای بررسی شد. برای اندازه‌گیری مقدار جذب سطحی بور، پنج گرم خاک در لوله‌های 50 میلی‌لیتری پروبیلنی منتقل شد و به هر یک از تیوپ‌های آزمایشی 20 میلی‌لیتر محلول (حاوی مقادیر 0، 2، 5، 8، 10، 15 و 20 میلی‌گرم در لیتر بور) در سه قدرت یونی (0/02، 0/06 و 0/12)، در دو سطح SAR 20 و 100 و pH های مختلف اضافه گردید. در نهایت مقدار بور جذب سطحی شده، از تفاوت غلظت اولیه و غلظت تعادلی محاسبه گردید. در همه تیمارها با افزایش غلظت تعادلی بور، مقدار جذب سطحی ابتدا با شیب زیاد افزایش یافت و سپس به مقدار نسبتاً ثابتی میل کرد. نتایج نشان داد با افزایش نسبت جذب سطحی سدیم و pH خاک جذب سطحی بور افزایش نشان داد. اثر نسبت جذب سطحی سدیم در غلظت‌های تعادلی پایین کم است، ولی با افزایش غلظت تعادلی اثر نسبت جذب سطحی سدیم بر جذب سطحی بور افزایش یافت. همچنین با افزایش قدرت یونی خاک احتمالاً به علت کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده جذب سطحی بور افزایش پیدا کرد. اثر مثبت قدرت یونی بر جذب سطحی بور نشان داد که مکانیزم غالب جذب سطحی بور تشکیل کمپلکس‌های درون کره‌ای است.

واژه‌های کلیدی: بور، لایه دوگانه پخشیده، نسبت جذب سطحی سدیم، یون‌های تبدالی

مقدمه

است که با جذب بور توسط ریشه گیاه و تخلیه بور در منطقه ریشه، منجر به آزاد شدن بور از سطوح جذب کننده می‌گردد. بنابراین سرعت آزاد شدن بور نقش تعیین‌کننده‌ای در فراهم آوردن بور برای گیاهان بازی می‌کند (28).

غلظت بور در محلول خاک و میزان جذب سطحی شده آن تعیین‌کننده غلظت بور در گیاهان است (14). بور جذب سطحی شده منبع نسبتاً دراز مدت بور در خاک است در حالی که بور محلول در آب به آسانی قابل جذب توسط گیاهان است، بنابراین بور جذب سطحی شده در خاک عامل کنترل‌کننده مقدار بور در خاک است (15). مهمترین عوامل مؤثر بر جذب سطحی بور در خاک عبارتند از: pH (12)، غلظت بور محلول (13)، بافت خاک (11)، نوع کانی‌های رسی (12)، مقدار و نوع مواد آلی (29) و نوع یون‌های تبدالی (18).

با افزایش قدرت یونی محلول، جذب سطحی بور روی رس‌ها افزایش می‌یابد (4، 6، 8، 17 و 19). افزایش قدرت یونی علاوه بر افزایش بارهای وابسته به pH کانی‌ها، موجب کاهش ضخامت لایه دوگانه الکتريکی سطح کانی‌ها می‌گردد. کاهش ضخامت لایه دوگانه

بور عنصری ضروری جهت رشد گیاهان به شمار می‌آید. حد فاصل آستانه کمبود و سمیت بور در خاک برای گیاهان نسبت به تمام عناصر غذایی ضروری دیگر کمتر می‌باشد (9). سمیت بور در بسیاری از خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک ایران و جهان گزارش شده است (16 و 21).

مطالعات نشان داده است که بور در اجزای مختلف خاک یا مکان‌های متفاوتی که دارای انرژی نگهداری خاص خود می‌باشند، نگهداری می‌گردد (31). قابلیت استفاده یک عنصر غذایی برای گیاه به سرعت آزاد شدن عنصر و جایگزینی در محلول خاک همزمان با جذب عنصر بستگی دارد. لذا برداشت بور توسط گیاه فرآیند پیوسته‌ای

1 و 2- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

* - نویسنده مسئول: (Email: mfbakhsh@ut.ac.ir)

3- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
DOI: 10.22067/jsw.v30i6.39015

اسید، اندازه‌گیری گردید (24) غلظت کلسیم منیزیم محلول بوسیله روش کمپلکسومتری با EDTA اندازه‌گیری گردید. سپس یک نمونه خاک با میزان شوری کم، نسبت جذب سطحی سدیم پایین، غلظت کم بور و ماده آلی پایین انتخاب شد.

همدمای جذب سطحی بور در نسبت خاک به محلول یک به چهار تعیین گردید. به این منظور مقدار پنج گرم خاک در لوله‌های سانتریفیوژ 50 میلی‌لیتری ریخته شد و به هر یک 20 میلی‌لیتر از محلول بور در الکترولیت زمینه تهیه شده از نمک‌های NaCl ، $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ و $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ اضافه گردید. به گونه‌ای که نمونه خاک در تعادل با محلول‌هایی حاوی 0 تا 2 میلی‌مول در لیتر بور، در سه قدرت یونی 0/02، 0/06 و 0/12 مولار و در دو سطح SAR 20 و 100 قرار گرفتند. با توجه به زمان تعادل به دست آمده در آزمایش اولیه، لوله‌ها به مدت 12 ساعت بر روی دستگاه تکان دهنده رفت و برگشتی با سرعت 110 دور در دقیقه در دمای 25 درجه سلسیوس قرار گرفتند. پس از پایان زمان تعادل، نمونه‌ها به مدت 15 دقیقه با سرعت 4000 دور در دقیقه سانتریفیوژ و بوسیله کاغذ واتمن 42 فیلتر شد و سپس مقدار بور جذب سطحی شده، از تفاوت غلظت اولیه و غلظت تعادلی محاسبه گردید. غلظت بور در کلیه محلول‌ها با روش آزومتین-H اندازه‌گیری گردید (16).

داده‌های جذب سطحی با استفاده از معادله لانگمویر توصیف گردیدند. پارامترهای معادله‌ها به روش رگرسیون خطی و غیر خطی (NILS) توسط نرم افزارهای SAS و SPSS محاسبه گردید و نمودارهای نهایی توسط نرم افزار Sigmaplot رسم شدند.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

درصد رس، درصد کربنات کلسیم معادل، درصد کربن آلی، هدایت الکتریکی، pH، فسفر قابل استفاده، کربن آل، میزان نسبت جذب سطحی سدیم و میزان بور در عصاره اشباع خاک مورد آزمایش در جدول 1 ذکر شده است.

سطح کانی‌های رس آلومینوسلیکاته موجب کاهش دافعه بارهای همنام و در نتیجه موجب نزدیک‌تر شدن یون‌های بورات به لیه کانی‌های رس می‌گردد (17). در $\text{pH} < \text{pKa}$ بور محلول عمدتاً به شکل مولکولی است، اما ممکن است بخشی از بور در نزدیکی سطح به یون بورات تبدیل شده و از طریق واکنش تبادل لیگاندی جذب گردد (25).

واکنش خاک نیز از مهمترین عواملی است که بر قابلیت دسترسی بور در خاک اثر دارد. جذب سطحی بور با افزایش pH افزایش می‌یابد (9). بور محلول در خاک‌ها ارتباط کاملاً معنی‌داری با pH محلول خاک دارد (2 و 5). از آنجایی که در خاک‌های مناطق خشک، Na^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} یون‌های تبادلی غالب هستند از SAR بعنوان یک شاخص مؤثر در ارزیابی خطر بالقوه سدیم، در محلول در حال تعادل با فاز جامد خاک یاد شده است، گرچه از شاخص‌ها دیگری مانند؛ نسبت سدیم تبادلی (ESR) و درصد سدیم تبادلی (ESP) نیز برای ارزیابی وضعیت سدیم در خاک استفاده می‌شود (7).

علی‌رغم تحقیقات مختلف در رابطه با جذب سطحی بور، اما اثر نسبت جذب سطحی سدیم بر رفتار جذبی بور کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا با توجه به اهمیت این عنصر در خاک و غالب بودن یون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم در مناطق خشک، در این پژوهش همدمای جذب سطحی بور در خاک تحت تأثیر اثر توأم نسبت جذب سطحی سدیم در سه سطح قدرت یونی در شرایطی نزدیک به حالت طبیعی خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک (نسبت بیشتر کلسیم به منیزیم) مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

ابتدا 30 نمونه خاک از عمق صفر تا 20 سانتی‌متری از زمین‌های کشاورزی و بایر شهرستان جیرفت تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه نمونه‌ها هوا خشک و از الک دو میلی‌متر رد شد. مقدار شوری در گل اشباع با استفاده از دستگاه هدایت سنج، غلظت سدیم محلول بوسیله دستگاه فلیم‌فوتومتر، pH عصاره اشباع با استفاده از دستگاه pH متر (26)، فسفر قابل استفاده با روش اولسن، ماده آلی خاک با روش والکی و بلاک و میزان کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی در

جدول 1- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

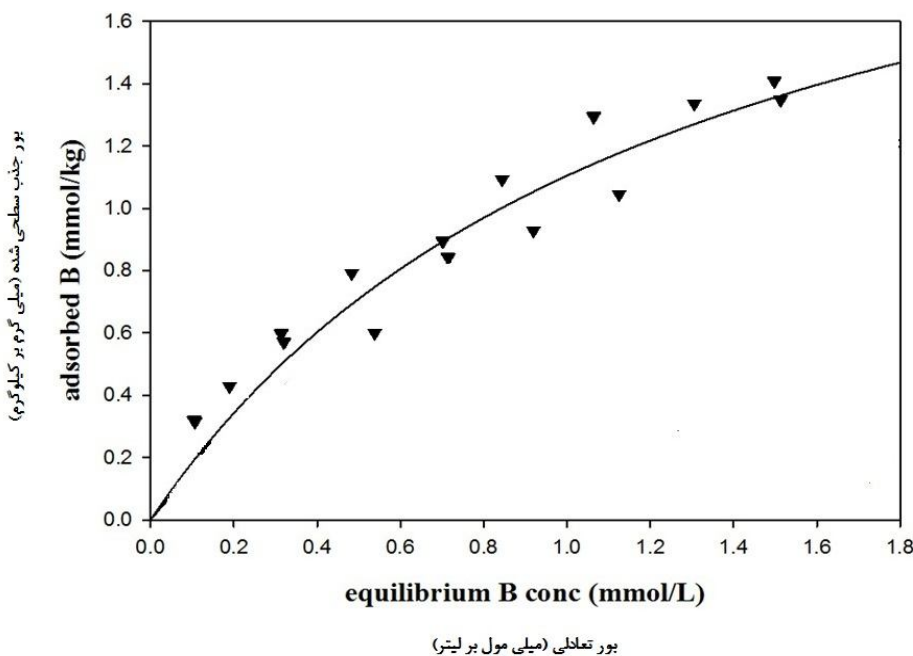
Table 1- Some chemical and physical properties of soil samples

بافت Texture (%)	فسفر قابل استفاده Available phosphorus (mg.kg^{-1})	بور Boron (mg.L^{-1})	نسبت جذب سطحی سدیم SAR (mmol.L^{-1}) ^{0.5}	ماده آلی Organig Matter (%)	کل مواد خنثی شونده TNV (%)	اسیدیته pH	قابلیت هدایت الکتریکی E_C (dS m^{-1})
لومی شنی Sandy Loam	13.1	0.382	2.3	0.31	11.9	7.89	0.87

همدمای جذب سطحی بور

نوع همدمای جذب سطحی بور در خاک مورد بررسی از نوع L می باشد (شکل 1). در این نوع همدمای جذب سطحی با افزایش غلظت محلول جذب شده مقدار جذب سطحی شده توسط سطح جامد بتدریج کاهش می یابد و در نهایت حالتی مقعر ایجاد می کند که اشباع تصاعدی روی فاز جامد را تداعی می کند. در پژوهش دیگری (22) نیز نشان داده شد که داده های جذب سطحی بور بر روی خاک مورد آزمایش نوع L می باشد.

اگر چه ماکزیمم جذب سطحی بور در نسبت های مختلف نسبت جذب سطحی سدیم متفاوت است ولی رفتار کلی آنها تقریباً مشابه است (رفتار لانگمویری). در همه تیمارها با افزایش غلظت تعادلی بور، مقدار جذب سطحی ابتدا با شیب زیاد افزایش می یابد و سپس به مقدار نسبتاً ثابتی میل می کند. در غلظت های پایین بور روند جذب سطحی آن در تیمارها تقریباً مشابه است ولی با افزایش غلظت تعادلی، تفاوت بیشتری در میزان جذب سطحی بور دیده می شود.



شکل 1- همدمای جذب سطحی بور در خاک (نوع L)
Figure 1- Isotherms adsorption of boron in soil (Type L)

بوریکی به آنیون بورات تفکیک می شود. افزایش آنیون بورات منجر به افزایش جذب بور در مکان های لبه ای کانی های خاک می شود، در نتیجه با افزایش نسبت جذب سطحی سدیم از 20 به 100 میزان جذب سطحی بور افزایش می یابد. مهرتورا و همکاران (23) بیان کردند یک رابطه معکوس بین بور محلول خاک و نسبت جذب سطحی سدیم آب آبیاری وجود دارد. همچنین یاداو و همکاران (30) گزارش دادند علائم سمیت بور در گیاهان با افزایش نسبت جذب سطحی سدیم از 0/5 به 40 کاهش یافت. که می تواند ناشی از افزایش جذب سطحی بور توسط ذرات خاک با افزایش نسبت جذب سطحی سدیم باشد. از طرف دیگر در نسبت جذب سطحی سدیم 100 نسبت به 20،

اثر نسبت جذب سطحی سدیم و pH

همانطور که در شکل های 2 تا 4 نشان داده شده است و نیز با توجه به پارامترهایی که در جدول 2 ارائه شده است. نتایج نشان داد اثر نسبت جذب سطحی سدیم در غلظت های تعادلی پایین کم است، ولی با افزایش غلظت تعادلی اثر نسبت جذب سطحی سدیم بر جذب سطحی بور افزایش می یابد. با افزایش نسبت جذب سطحی سدیم از 20 به 100 ما شاهد افزایش جذب سطحی بور در خاک هستیم. بر اساس نتایج بدست آمده کرن و اکاتر (19) با افزایش غلظت سدیم ناشی از افزودن سدیم کلراید در خاک دو فرآیند اتفاق می افتد: 1- افزایش تفکیک اسید بوریکی به آنیون بورات 2- افزایش بار منفی لبه ای کانی ها. بنابراین با افزایش غلظت سدیم میزان بیشتری از اسید

pH های 8، 8/5 و 9 به ترتیب تنها 83، 91 و 60 درصد بور به صورت H_3BO_3 است. بنابراین با افزایش pH جذب سطحی بور به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در pH های بالاتر این فرآیند در تقابل با پروتون‌زدائی از گروه‌های عاملی سطحی کانی قرار می‌گیرد که پتانسیل بار سطحی برای جذب سطحی بور را کاهش می‌دهد (15). گلدبرگ و فاستر (11) نیز جذب سطحی بور روی خاک را بررسی کردند و دریافتند حداکثر جذب سطحی بور در $pH=9/6$ صورت می‌گیرد.

افزایش pH رخ داده و pH خاک از 8/3 به 8/7 افزایش پیدا کرده است از آنجایی که در حدود $pH=9/5$ حداکثر جذب سطحی بور رخ می‌دهد، با توجه به اینکه در این pH تفکیک بور بیشتر می‌شود میزان جذب سطحی بور رو به افزایش است. در بررسی اثر قدرت یونی بر توزیع گونه‌های محلول بور گزارش شد که در $pH=7$ ، تقریباً 99 درصد بور در محلول به شکل H_3BO_3 می‌باشد. از نظر الکترواستاتیکی سطح باردار کانی تمایل چندانی برای جذب سطحی مولکول‌های غیر باردار H_3BO_3 را ندارد. در pH بیشتر از 7، H_3BO_3 به تدریج تفکیک می‌شود و یون بورات تشکیل می‌شود، بطوری که در

جدول 2- ضریب تشخیص، خطای معیار تخمین و پارامترهای محاسبه شده معادله لانگمویر

Table 2- Adsorption maximum (q_{max})* 3 and "affinity constant" (KL) of interaction of boron derived from modeling of adsorption data with the Langmuir equation.

تیمار Treatment	حداکثر جذب سطحی q_{max}^*	ضریب توزیع K^*	خطای معیار تخمین SEE	ضریب تشخیص R^2
I= 0.02 , SAR= 20	1.801	1.006	0.062	0.97
I= 0.02 , SAR= 100	2.029	0.839	0.055	0.98
I= 0.06 , SAR= 20	1.162	1.518	0.048	0.97
I= 0.06 , SAR= 100	2.049	0.781	0.047	0.98
I= 0.12 , SAR= 20	0.799	1.941	0.096	0.98
I= 0.12 , SAR= 100	4.188	0.296	0.105	0.96

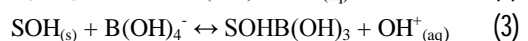
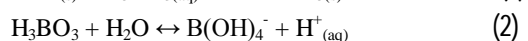
* واحد حداکثر جذب سطحی بور (q_{max}) و k به ترتیب برحسب $mmol.kg^{-1}$ و $L.mmol^{-1}$ است

* q_{max} and KL are respectively based on $mmol.kg^{-1}$ and $L.mmol^{-1}$

قدرت یونی بر جذب سطحی بور افزایش می‌یابد. با افزایش قدرت یونی از 0/02 به 0/06 و به 0/12 میزان حداکثر جذب سطحی از 2/2 میلی‌مول در کیلوگرم خاک به 2/4 و 4/2 میلی‌مول در کیلوگرم خاک افزایش یافت. این میزان به ترتیب معادل 10 و 75 درصد افزایش در حداکثر جذب سطحی بور می‌باشد. اثر قدرت یونی بر مقدار عددی ضریب K متفاوت از اثر آن روی q_{max} است. با افزایش قدرت یونی مقدار ضریب k کاهش یافت.

افزایش قدرت یونی بر مقدار بار دائمی (ناشی از جایگزینی همشکل) کانی‌ها اثری ندارد، اما موجب افزایش بار وابسته به pH کانی‌های ناشی از جذب و آزادسازی پروتون می‌گردد. این نوع بار، عمدتاً بر روی لبه کانی‌های رس، لبه‌ها و سطوح اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزات، کربنات‌های کلسیم و منیزیم و مواد آلی قرار دارد (3). مطالعات اسپکتروسکوپی جذب سطحی یون‌ها بر روی کانی‌ها نشان داده است که توزیع یون‌های جذب سطحی شده با توزیع یون‌ها در فاز محلول لزوماً یکسان نیست و ممکن است بخشی از بور در نزدیکی سطح به یون بورات تبدیل شده و از طریق واکنش تبادل لیگاندی جذب گردد (25). با افزایش قدرت یونی محلول جذب سطحی بور روی رس‌ها افزایش می‌یابد (8 و 17).

اثر متقابل این دو فرآیند که موجب افزایش و سپس کاهش جذب سطحی بور در خاک می‌گردد در واکنش‌های 1 تا 4 ارائه شده است (14 و 10).

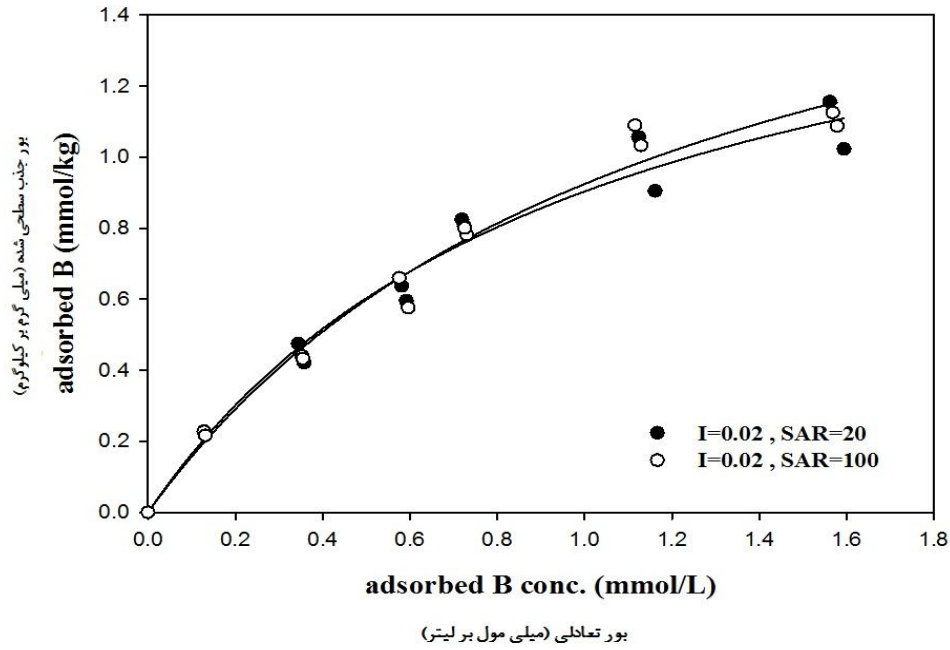


که در آن SOH نشان دهنده گروه‌های هیدروکسیل سطحی فعال در اکسیدها و کانی‌های رس در خاک می‌باشد.

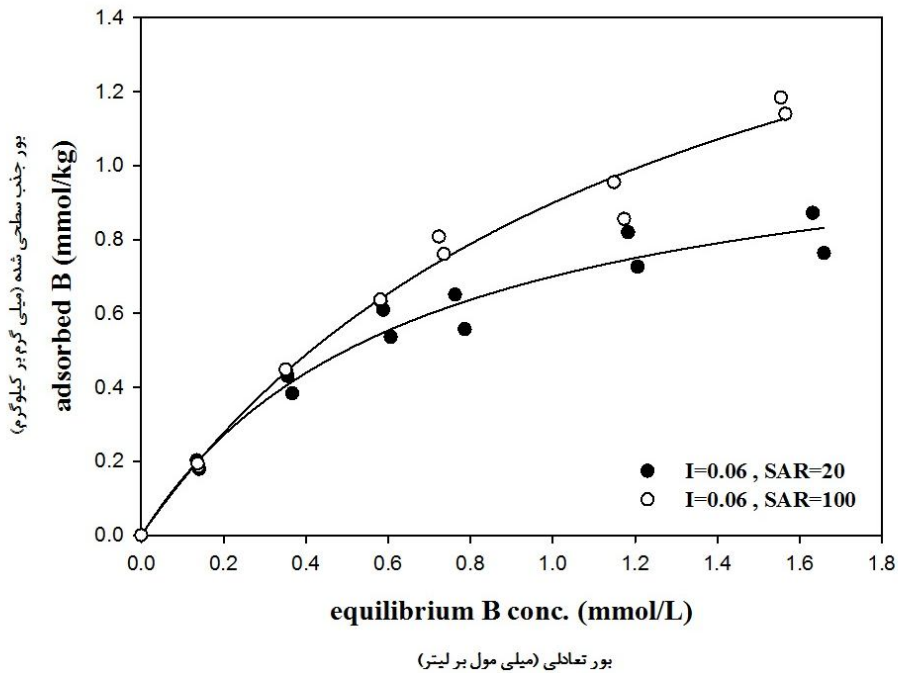
با توجه به تنوع زیاد در کانی‌ها خاک و تفاوت در خصوصیات شیمیایی آنها، تفسیر اثر نسبت جذب سدیم بر جذب سطحی بور چندان ساده نیست ولی می‌توان گفت برای پنداری از اثر عوامل فوق است.

اثر قدرت یونی

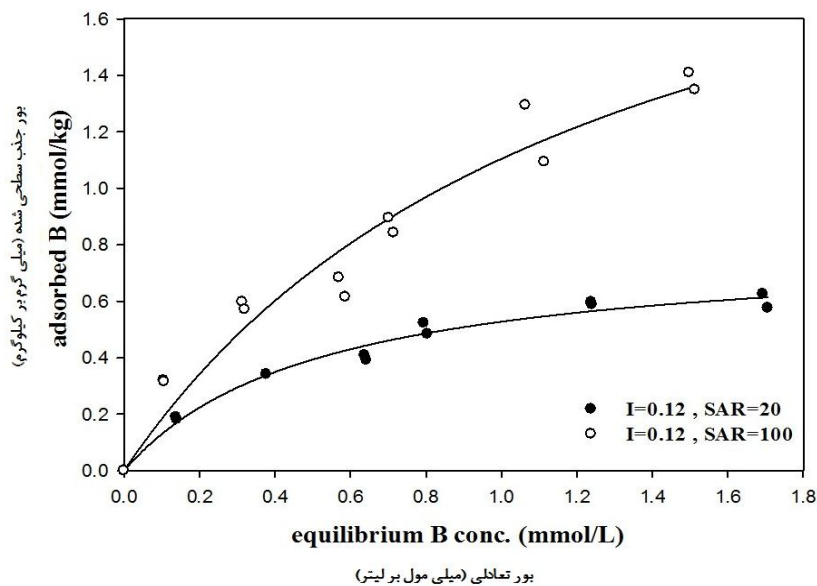
جذب سطحی بور در سه قدرت یونی 0/02، 0/06 و 0/12 مولار در خاک اندازه‌گیری گردید. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل 5 نشان داده شده است. این داده‌ها نیز با معادله لانگمویر بخوبی توصیف گردید. همانطور که در شکل دیده می‌شود اثر قدرت یونی در غلظت‌های تعادلی پایین کم است، ولی با افزایش غلظت تعادلی اثر



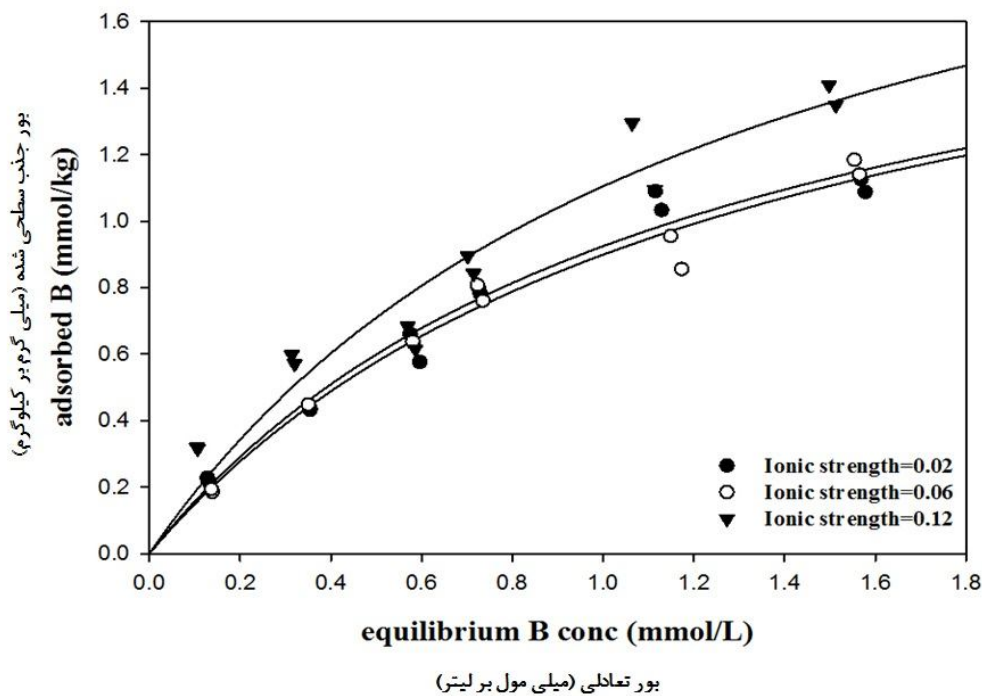
شکل 2- تأثیر قدرت یونی 0.02 M و دو نسبت جذب سطحی سدیم (20 و 100) بر جذب سطحی بور
 Figure 2 - The effect of ionic strength (IS) 0.02M and two sodium adsorption ratio (SAR) 20 and 100 on the adsorption of boron



شکل 3- تأثیر قدرت یونی 0/06 M و دو نسبت جذب سطحی سدیم (20 و 100) بر جذب سطحی بور
 Figure 3- The effect of ionic strength (IS) 0.06M and two sodium adsorption ratio (SAR) 20 and 100 on the adsorption of boron



شکل 4- تأثیر قدرت یونی 0/12 M و دو نسبت جذب سطحی سدیم (20 و 100) بر جذب سطحی بور
 Figure 4- The effect of ionic strength (IS) 0.12M and two sodium adsorption ratio (SAR) 20 and 100 on the adsorption of boron



شکل 5- رابطه بور جذب سطحی شده با قدرت یونی
 Figure 5 - Relationship between ionic strength (IS) 0.02 to 0.12 M and adsorbed boron

مکانیزم غالب جذب سطحی بور تشکیل کمپلکس‌های درون کره‌ای است (15). چنانچه فرض شود این مکانیزم بر جذب سطحی بور تأثیر گذارد، می‌توان بخشی از اثر قدرت یونی بر افزایش جذب سطحی بور را وابسته به آن دانست.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد افزایش نسبت جذب سطحی سدیم از 20 به 100 و افزایش pH محلول خاک موجب افزایش جذب سطحی بور گردید. اثر نسبت جذب سطحی سدیم در غلظت‌های تعادلی پایین کم است، ولی با افزایش غلظت تعادلی اثر نسبت جذب سطحی سدیم بر جذب سطحی بور افزایش می‌یابد. افزایش قدرت یونی نیز موجب افزایش جذب سطحی بور شد، که در قدرت‌های یونی بالاتر میزان جذب بسیار بیشتر است. احتمالاً تفکیک بیشتر اسید بوریک به آنیون بورات و کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده از عوامل مؤثر در افزایش جذب سطحی بور است.

شکل 5 بیانگر آن است که با افزایش قدرت یونی از 0/02 به 0/12 مولار، جذب سطحی بور افزایش یافت. احتمالاً با افزایش غلظت املاح محلول در خاک و کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده سبب کاهش دافعه بارهای همنام شده و در نتیجه آنیون بورات می‌تواند در فاصله نزدیکتری نسبت به سطح قرار گیرد و احتمال جذب شدن آن افزایش می‌یابد (17).

مقدار ZPC کانی‌های رس اغلب پایین است و بنابراین در pH معمول خاک، خالص بار این کانی‌ها منفی است. ZPC کربنات‌ها نیز در حدود 7-9 است (20) و لذا بسته به نوع کانی و درجه خلوص آن ممکن است دارای مقداری بار مثبت در pH معمول خاک باشند. بنابراین خالص بار این کانی‌ها در pH معمول در خاک‌ها مثبت است. بر این اساس کربنات‌های کلسیم و منیزیم یکی اجزای جامد جذب سطحی اکسی آنیون‌ها از جمله یون بورات در خاک می‌باشند. پس افزایش قدرت یونی روی سطوح ذکر شده می‌تواند نسبت به سطوح دارای خالص بار منفی به میزان بیشتری موجب افزایش جذب سطحی بور گردد.

اثر مثبت قدرت یونی بر جذب سطحی بور نشان می‌دهد که

منابع

- 1- Arora H., Bhardwaj S., and Sharma B. 2006. Boron adsorption on benchmark soils of Punjab. *Asian Journal of Chemistry*, 18:1313-1320.
- 2- Berger K., and Truog E. 1946. Boron availability in relation to soil reaction and organic matter content. *Soil Science Society of America Journal*, 10:113-116.
- 3- Bohn H. L., Myer R. A., and O'Connor G. A. 2002. *Soil chemistry*. Wiley
- 4- Couch E. L., and Grim R. E. 1968. Boron fixation by illites. *Clays Clay Miner*, 16(3).
- 5- Elrashidi M., and O'Connor G. 1982. Boron sorption and desorption in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 46(1):27-31.
- 6- Fleet M. 1965. Preliminary investigations into the sorption of boron by clay minerals. *Clay Miner*, 6(3):3-16.
- 7- Frenkel H. 1984. Reassessment of water quality criteria for irrigation. *Soil salinity under irrigation-Processes and management*, *Ecological Studies*, 51:144-172.
- 8- Goldberg S. 1993. *Chemistry and Mineralogy of Boron in Soils*. U. C. Gupta (Ed.). Boron and its role in crop production. Boca Raton, USA, CRC Press.
- 9- Goldberg S. 1997. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193:35-48.
- 10- Goldberg S. 2005. Inconsistency in the triple layer model description of ionic strength dependent boron adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 285: 509-517.
- 11- Goldberg S., and Forster H. 1991. Boron sorption on calcareous soils and reference calcites. *Soil Science*, 152:304-310.
- 12- Goldberg S., and Glaubig R. A. 1986. Boron adsorption and silicon release by the clay minerals kaolinite, montmorillonite and illite. *Soil Science Society of America Journal*, 50:1442-1448.
- 13- Goldberg S., Lesch S. M., and Suarez D. L. 2000. Predicting boron adsorption by soils using soil chemical parameters in the constant capacitance model. *Soil Science Society of America Journal*, 64:1356-1363.
- 14- Goli E., Rahnamaie R., Hiemstra T., and Malakouti M. J. 2011. The interaction of boron with goethite: Experiments and CD-MUSIC modeling. *Chemosphere*, 82:1475-1481.
- 15- Hassani A., Rahnamaie R., and Malakouti M. J. 2011. Effect of calcium carbonate and ionic strength on boron adsorption in calcareous soils. *Iranian journal of soil Research*, 24:117-126.
- 16- Keren R. 1996. Boron. p. 603-626. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 3. Chemical methods.

- SSSA and ASA, Madison, WI.
- 17- Keren R., and Sparks D. 1994. Effect of pH and ionic strength on boron adsorption by pyrophyllite. *Soil Science Society of America Journal*, 58(4):1095-1100.
 - 18- Keren R., and Gast R. 1981. Effects of wetting and drying, and of exchangeable cations, on boron adsorption and release by montmorillonite. *Soil Science Society of America Journal*, 45:478-482.
 - 19- Keren R., and O'Connor G. 1982. Effect of exchangeable ions and ionic strength on boron adsorption by montmorillonite and illite. *Clays Clay Miner*, 30:341-346.
 - 20- Kosmulski M. 2001. *Chemical properties of material surfaces*. Marcel Dekker, Inc., New York.
 - 21- Majidi A., and Malakouti M. J. 2007. Study of boron toxicity in fruits gardens near Uremia Lake. Tehran, Iran, Department of soil science, Tarbiat Modares University, (in Persian with English abstract).
 - 22- Majidi A., Rahnemaie R., Hassani A., and Malakouti M.J. 2010. Adsorption and desorption processes of boron in calcareous soils. *Chemosphere*, 80:733-739.
 - 23- Mehrotra N.K., and Khan S.A. 1989. Agarwala. High SAR (sodium adsorption ratio) irrigation and boron phytotoxicity in sugar beet. *Ann. Arid Zone*, 28:69-78.
 - 24- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis, part2, chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Madison, WI.
 - 25- Peak D., Luther III G.W., and Sparks D.L. 2003. ATR-FTIR spectroscopic studies of boric acid adsorption on hydrous ferric oxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, 2551-2560.
 - 26- Rhoades J.D. 1982. Soluble salts. p. 167-179. In: A.L. Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. 2nd ed. Agronomy monograph no.9. SSSA and ASA, Madison, WI.
 - 27- Shainberg I., and Singer M. 1990. Soil response to saline and sodic conditions. *Agricultural salinity assessment and management*. Am. Soc. Civil Eng. ASCE New York: Manuals and Reports on Engineering Practice.
 - 28- Sparks D. L. 2003. *Environmental soil chemistry*, Access Online via Elsevier.
 - 29- Xu D., and Peak D. 2007. Adsorption of boric acid on pure and humic acid coated am-Al (OH) 3: a boron K-edge XANES study. *Environmental Science and Technology*, 41:903-908.
 - 30- Yadav H.D., Yadav O.P., Dhankar O.P., and Oswal M.C. 1989. Effect of chloride salinity and boron on germination, growth and mineral composition of chickpea (*Cicer arietinum*). *Ann. Arid Zone*, 28:63-67.
 - 31- Yermiyahu U., Keren R., and Chen Y. 1995. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 405-409.

Archive SID

Adsorption Isotherms of Boron in Soil: the Effects of Sodium Adsorption Ratio (SAR), pH and Ionic Strength

M. Moghbeli¹- M. Farahbakhsh^{2*}- N. Boroomand³

Received: 30-09-2014

Accepted: 10-10-2016

Introduction: Boron (B) is an essential plant micronutrient whose soil availability is influenced by many soil factors. Understanding the processes controlling activity of boron (B) in the soil solution is important for soil fertility management. The reaction of adsorption and desorption of boron in soil determines the amount of boron that is available to plants. Adsorption-desorption processes play a major role on boron equilibrium concentration and therefore on its bio-availability. Ionic strength, pH and ionic composition in exchangeable phase are among the major factors affecting B adsorption reactions. Reduced adsorption of boron at high pH is because of a surface potential decrease on minerals with pH-dependent charge. Ionic strength has also a considerable effect on B adsorption. Several studies have been performed in the adsorption of boron and the effect of factors such as ionic strength and cations has been understudied, however, the effect of sodium adsorption ratio and its interaction with the ionic strength on boron adsorption behavior has not been reported. In this study, the adsorption isotherms of boron in the soils affected by the combined effects of ionic strength and sodium adsorption ratio were investigated.

Materials and Methods: In order to assess the effects of ionic strength (IS) and Sodium Adsorption Ratio (SAR) on availability of B, the adsorption of B was investigated in a calcareous soil that had low levels of electrical conductivity, sodium adsorption ratio and available P. For this purpose, 5 g soil was equilibrated with 20 mL of B solution (0, 2, 5, 8, 10, 15, 20 mg L⁻¹) in 0.02, 0.06 and 0.12 M background solutions (prepared by NaCl, CaCl₂.2H₂O, MgCl₂.6H₂O), at two SAR levels (20 and 100). The reaction temperature was 25°C. The suspension was centrifuged, filtered, and a sample was removed and B was determined by Azomethine-H spectrophotometric method (at a wavelength of 420 nm). B adsorption in Soil was obtained by subtracting B in solution after filtration, from added boron.

Results and Discussion: The Langmuir isotherm was well fitted to the adsorption data based on the R² and SEE. At different IS and SAR levels, the soil exhibited different adsorption behaviors. The effect of SAR on the boron adsorption was greater at high concentrations. The results showed the increase in sodium adsorption ratio, increased soil pH and Boron adsorption. An increase in sodium adsorption ratio up to 100 resulted in a small increase in Boron adsorption compared to SAR=20. With sodium adsorption ratio of 100, soil pH increased from 8.3 to 8.7. At about PH=9.5, maximum adsorption occurs because boron dissociation is greater when pka = pH. Increasing ionic strength increased the boron adsorption; the adsorption rate was much higher at higher ionic strength. Model-predicted and experimental parameters obtained using the Langmuir equation pointed to the large effect of salt concentration on the boron adsorption which was an increase of around 10% and 75% in q_{max} as a result of an increase in salt concentration from 0.02 to 0.06 and 0.12 M respectively. We can ignore the effect of salt at very low equilibrium concentration; however, it increases gradually with increasing the equilibrium concentration of boron.

Conclusion: The results of the present study showed that sodium adsorption ratio was low, in low equilibrium concentration related to low boron concentration, but the equilibrium concentration of boron increased with increasing the sodium adsorption ratio. In sodium adsorption ratio of 100, increasing pH increased the adsorption of boron. Boron adsorption was increased with increasing ionic strength; the adsorption rate was much higher than the rate of increase in ionic strength. Increasing the ionic strength suppresses the DDL on planar surface and therefore more negative borate ions are able to move close enough to interact with the adsorption sites located on the edge surfaces. Assuming that this phenomenon affects the adsorption of boron, the effect of ionic strength on boron adsorption can be partly dependent on it. Due to the high variability of soil minerals and the differences in their chemical properties, interpretation of the effect of ionic strength on adsorption of boron is not easy, but we can say that it is the sum of the effects of the above-mentioned factors. The positive effect of ionic strength on boron adsorption may suggest that the formation of inner sphere complex is the dominant mechanism for boron adsorption.

1 and 2- Former MSc Student and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tehran University
(*- Corresponding Author Email: mfbakhsh@ut.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman

Keywords: Boron, Diffuse double layer, Ions exchangeable, Sodium adsorption ratio

Archive of SID