

## اکولوژی ریزگردها

### ترجمه مقاله با عنوان: The Ecology of Dust

Jason P Field, Jayne Belnap, David D Breshears, Jason C Neff, Gregory S Okin, Jeffrey J Whicker, Thomas H Painter, Sujith Ravi, Marith C Reheis, and Richard L Reynolds

مترجم: حسین مرادی\*

استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۱۸؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۶/۲۷)

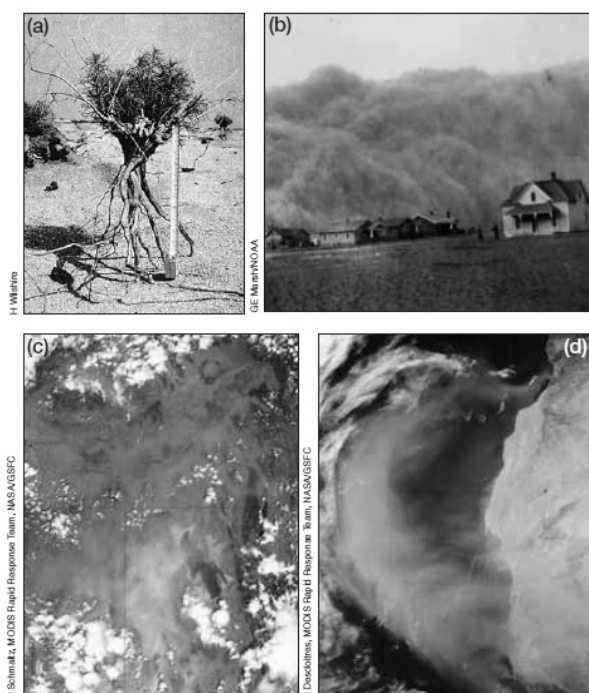
#### چکیده

فرسایش بادی و به همراه آن انتشار ریزگردها نقشی بنیادی در فرآیندهای اکولوژیک بازی کرده و ارتباطات بیوژئوشیمیایی مهمی را در مقیاس‌های مختلف از فضای اطراف یک گیاه تا کل کره زمین فراهم می‌آورد. هنوز هم، فرآیندهای مرتبط با ریزگردها در بسیاری از پژوهش‌های اکولوژیکی به‌طور آشکار لحاظ نمی‌گردد، این می‌تواند بدین دلیل باشد که بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با فرآیندهای بادی از دیدگاه «علوم زمین» بدان پرداخته شده و مسائل اکولوژیکی مدنظر نبوده است. برای رفع این شکاف علمی، ما در این مقاله اهمیت ریزگردها از دیدگاه اکولوژیک را مورد بررسی قرار داده و ارتباطات متقابل بین فرسایش بادی و پویایی اکوسیستم‌ها از مقیاس گیاهان و فضای اطراف آن تا مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی را تحلیل نموده‌ایم. همچنین، با ارائه مثال‌هایی به این نکته خواهیم پرداخت که چگونه آشفته‌گی، این ارتباطات متقابل را تحت تأثیر قرار داده و چه پیامدهایی را موجب خواهد شد. احتمالاً، تغییرات اقلیمی و تنش در کاربری اراضی به افزایش تولید ریزگردها از اراضی خشک منجر خواهد شد. با بیان این مباحث، بایستی متخصصان محیط‌زیست، مالکان و مدیران اراضی، و سیاستگذاران بیش از پیش فرسایش بادی و انتشار ریزگردها را در تصمیمات مدیریتی خود لحاظ کنند.

**کلید واژه‌ها:** تغییر اقلیم، تغییر کاربری زمین، پوشش زمین، ریزگردها

## سرآغاز

می‌گیرند. ( Tanaka and Chiba, ۲۰۰۶; Neff, et al., ۲۰۰۸). فرسایش بادی و انتشار ریزگردها پیامدهای منفی قابل ملاحظه‌ای به دنبال دارند. این پیامدها نه فقط برای سلامت انسان خطرساز خواهند بود، بلکه مشکلات فراوانی را برای فرآیندهای اکوسیستم‌ها به بار خواهند آورد. مقیاس این پیامدها متفاوت بوده و از مقیاس بسیار کوچک مانند فضای اطراف یک گیاه شکل (۱a)، مقیاس محلی تا منطقه‌ای شکل (۱b و ۱c) تا مقیاس جهانی متغیر است شکل (۱d).

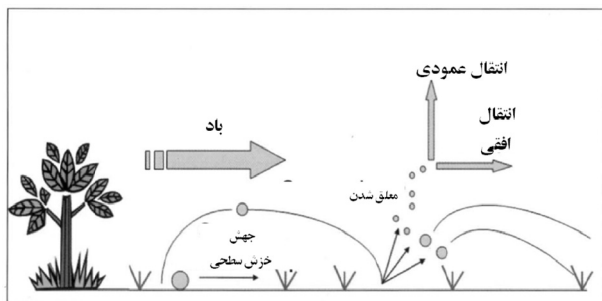


شکل (۱): (a) در مقیاس یک گیاه: گیاهی که ریشه‌های آن در اثر طوفان Joaquin Vally در دسامبر ۱۹۷۷ از زیر خاک بیرون زده است. (b) مقیاس محلی: طوفان ریزگردها به منطقه استرادفورد در تگزاس نزدیک می‌شود. (c) مقیاس منطقه‌ای: طوفان گرد و غبار که در ۲۳ جولای ۲۰۰۳ از بخش‌های غربی یوتا نشات گرفته و به سمت دریاچه Great Salt در حرکت است. (d) مقیاس جهانی: انتقال ذرات ریزگردها بر فراز اقیانوس اطلس، عکس شرق آفریقا را در ۲ مارس ۲۰۰۳ نشان می‌دهد.

در این مقاله یک مجموعه‌ای از اهمیت فرآیندهای بادی<sup>(۱)</sup>، فرسایش منتج شده از آن، و همچنین مروری بر ارتباطات اکولوژیکی آن‌ها در مقیاس‌های مختلف، به همراه ارتباطات

برای بسیاری از افراد، ریزگردها فقط ذراتی است که بر روی کامپیوترشان نشسته است. این در حالی است که ریزگردها فرآیند اکولوژی پیچیده‌ای داشته و با چالش‌های محیط‌زیستی ارتباط تنگاتنگی دارند. ریزگردها ذرات بسیار ریزی از مواد بوده که بر اثر فرسایش بادی از سطح زمین جدا شده و به دلیل ریز بودن در هوا معلق می‌شوند که تولیدشان به نوع اقلیم و همچنین به نوع کاربری اراضی بستگی دارد ( Toy, et al., ۱۹۴۱; Bagnold, ۲۰۰۲). برای اینکه به اهمیت ریزگردها از نظر اکولوژی پی ببریم، بهتر است طوفان ریزگردهای دهه ۱۹۳۰ در صحرای آمریکا را مرور کنیم (Peters, et al., ۲۰۰۷). این وقایع به نظر بسیاری از متخصصان، یکی از شدیدترین و وحشتناک‌ترین حوادث محیط‌زیستی تاریخ آمریکاست. گسترش فعالیت‌های کشاورزی در سطح بسیار وسیع در حاشیه‌های کویر، به همراه خشکسالی دهه ۱۹۳۰ موجب افزایش فرسایش بادی در این منطقه شد که تخریب بیش از ۹۰ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی (Utz et al. ۱۹۳۸) را به دنبال داشت. و همچنین از دست رفتن حدود ۸۰۰ میلیون تن خاک‌های سطحی فقط در سال ۱۹۳۵، را به دنبال داشت ( Johnson, ۱۹۴۷; Hansen and Libecap, ۲۰۰۴). این فرسایش بادی با این گستره از آنجا سرچشمه گرفت که لکه‌های کوچکی در سطحی وسیع بسیار حساس به فرسایش بادی شده بودند ( Hanson and Libecap, ۲۰۰۴) و در نهایت از به هم پیوستن آن‌ها کل محیط در آستانه پاسخی خطرناک قرار گرفت و آن چیزی جز طوفان‌های سنگین ریزگردها نبود (Peters, et al., ۲۰۰۷). مشاعده این همه اثرات ویران‌کننده در نتیجه طوفان‌های ریزگردها باعث شد که سازمان حفاظت خاک آمریکا در سال ۱۹۳۵ ایجاد شود. با این حال، امروزه حساسیت مردم و حتی متخصصین نسبت به آثار طوفان‌ها کمتر شده و در اکثر تحقیقات اکولوژیکی، اثر جریان‌ات ریزگردها و فرسایش بادی را به طور مشخص لحاظ نمی‌شود. امروزه سازمان حفاظت از منابع طبیعی آمریکا، همان سازمان حفاظت خاک سابق، بیشتر بر روی فرسایش آبی متمرکز شده و فرسایش بادی را رها کرده است (Field, et al., ۲۰۰۹). اما جای امیدواری است زیرا متخصصان محیط‌زیست به طور فرآیندهای ریزگردها را به‌عنوان یک عامل محیط‌زیستی مهم در مدل‌های تغییر اقلیم در نظر

یافته و این در حالی است که در مناطق نشست ریزگردها<sup>(۶)</sup> خاک غنی تر می‌شود (Li, et al., ۲۰۰۷).



شکل (۲): چگونه فرسایش بادی عمل می‌کند. جهش زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت برش باد از سرعت برش آستانه خاک بیشتر شود؛ معلق شدن ذرات بسیار ریزگرد مانند زمانی به وقوع می‌پیوندد که نیروی سایشی باد بر نیروی قوی نگهدارنده بین ذرات بر خاسته از سطح خاک غلبه کند.

میزان فرسایش بادی و انتشار ریزگردها در مناطق مختلف تحت تأثیر فاکتورهای مختلفی از قبیل گرادیان‌های باد در مقیاس میکرو، و همچنین رطوبت نسبی هوا است (Toy, et al., ۲۰۰۲). سرعت باد به میزان انرژی در دسترس برای حرکت رسوبات بستگی دارد. تحقیقات بسیاری در زمینه تعیین سرعت سایش آستانه<sup>(۷)</sup> انجام گرفته است، سرعت سایش آستانه به سرعتی از باد گویند که ذراتی دارای اندازه معین در یک شرایط محیطی معین شروع به جدا شدن از سطح خاک می‌کنند (Gillette, et al., ۱۹۹۷). از آنجا که رطوبت موجود در خاک سطحی در یک تبادل همیشگی با رطوبت هواست، بنابراین، رطوبت نسبی هوا، رطوبت خاک را در لایه سطحی آن کنترل می‌کند. این مسئله در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار مشهود است (Ravi, et al., ۲۰۰۴). این پدیده بسیار مهمی است زیرا رطوبت خاک نیروهای بین ذرات خاک را تحت تأثیر قرار داده و به دنبال آن سرعت سایش آستانه تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. در نتیجه، یک ارتباط آشکار اما پیچیده‌ای بین رطوبت نسبی هوا، اندازه ذرات خاک و فرسایش‌پذیری آن پدید می‌آید (Ravi, et al., ۲۰۰۴). فرسایش بادی ممکن است در کنش و واکنش با فرسایش آبی باشد، اگرچه مطالعات اندکی این موضوع را به طور مشخص نشان داده‌اند (Field, et al., ۲۰۰۹). به‌طور کلی، این

بیوژئوشیمیایی فراهم آمده است. یک نکته بسیار مهم، که در تحلیل‌های فرسایش بادی نقش اساسی بازی می‌کند این است که فرسایش بادی پاسخی غیرخطی به آشفته‌گی‌هایی<sup>(۲)</sup> است که باعث می‌شوند پوشش سطح خاک به میزان کمتر از میزان آستانه آن کاهش یابد. ما در این مقاله به این مسأله می‌پردازیم که چگونه اثر تغییر اقلیم (Seager, et al., ۲۰۰۷) و تنش در کاربری اراضی (Okin, et al., ۲۰۰۶) می‌تواند موجب انتشار ریزگردها از مناطق خشک شده و چالش‌های محیط‌زیستی کلانی را برای مدیران و سیاستگذاران بوجود می‌آورد.

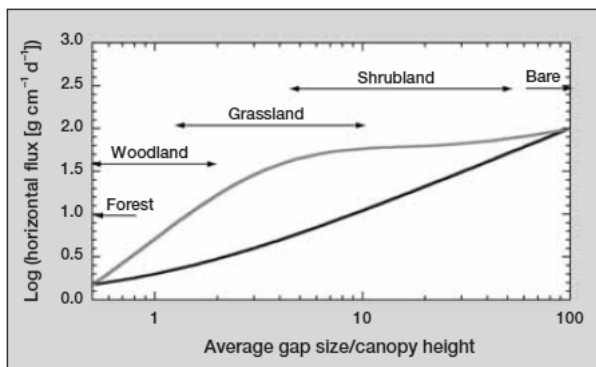
### کلیات فرسایش بادی

به طور علمی باد با سه مکانیسم ذرات خاک را منتقل می‌کند (شکل ۲) که براساس قطر ذرات خاک متمایز شده‌اند. (۱) خزش سطحی<sup>(۳)</sup>، که زمانی اتفاق می‌افتد که قطر ذرات بیشتر از ۵۰۰ میکرومتر باشند، (۲) جهش<sup>(۴)</sup>، زمانی که قطر ذرات بین ۲۰-۵۰۰ میکرومتر باشند، و (۳) معلق شدن<sup>(۵)</sup>، که برای ذراتی با قطر کمتر از ۲۰ میکرون اتفاق می‌افتد (Bagnold, ۱۹۴۱; Toy, et al., ۲۰۰۲; Goudie and Middleton, ۲۰۰۶). هر سه این مکانیسم‌ها خاک را به همراه آن عناصر غذایی خاک و مواد آلی آن‌ها در مقیاس‌های مختلف جابه‌جا خواهند کرد (Field, et al., ۲۰۰۹). خزش‌های سطحی ناشی از فرسایش بادی و جهش‌های ذرات خاک بخش عظیمی از جابجایی‌های خاک را در مقیاس محلی (کمتر از چند متر)؛ (Stout and Zobeck, ۱۹۹۶) به خود اختصاص داده است. برعکس، ذرات خاک معلق شده، می‌توانند فاصله‌های بسیار دوری را بپیمایند و در مقیاس منطقه‌ای، قاره‌ای و حتی جهانی جابه‌جا شوند (Chadwick, et al., ۱۹۹۹; Prospero, et al., ۲۰۰۲; Goudie and Middleton, ۲۰۰۶).

بیشتر انتقال افقی رسوبات بادی در لایه‌های نزدیک به سطح خاک اتفاق می‌افتد و شدیداً با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد (Shao, et al., ۱۹۹۳). فقط بخش کوچکی از این جریان ذرات خاک خواهند توانست معلق شده و مسیرهای طولانی را طی کنند. به‌طور کلی، جریان‌های عمودی یک همبستگی خطی با جریان‌های افقی دارند (Gillette, et al., ۱۹۹۷).

از آنجا که عناصر غذایی خاک (از جمله نیتروژن و فسفر) و مواد آلی اغلب همراه ذرات کوچکتر خاک منتقل می‌شوند، حاصلخیزی خاک در مناطق منشأ ریزگردها به شدت کاهش

البته به جز مناطقی که پوشش گیاهی نداشته و با سنگ‌ها و قله سنگ‌ها و یا با پوسته‌های فیزیکی و یا مالچ‌ها پوشیده شده‌اند). میزان این مواد همچنین به ارتفاع و تراکم پوشش گیاهی بستگی دارد. البته فضای محافظت شده در اطراف گیاهان بسته به دو عامل اخیر است. اگر چه ویژگی‌های سطح خاک مهم هستند، اما میزان جریان عمودی ذرات خاک بیش از همه به ساختار اکوسیستم و درجه اتصال<sup>(۱۲)</sup> بین گپ‌های عاری از پوشش گیاهی بستگی دارد (شکل ۳)، (Okin, et al., ۲۰۰۹). در صورتی که فضای بین گیاهان عاری از هر نوع پوششی باشد، فقط فضایی حدود ۵ تا ۱۰ برابر ارتفاع گیاهان (در جهت وزش باد) در مقابل فرسایش بادی محافظت خواهد شد. بنابراین، مناطق عاری از پوشش گیاهی که بعد از این فاصله واقع شده‌اند از این حفاظت برخوردار نیستند (Okin, ۲۰۰۸). این آشفتگی در پوشش سطح خاک منجر به یک ناهمگنی در میزان فرسایش، میزان حرکت خاک و باقیمانده گیاهان و همچنین غلظت این منابع در زیر تاج پوشش گیاهان می‌شود. ذراتی که اندازه مناسبی برای جهش دارند، در مناطق محافظت شده زیر تاج پوشش گیاهان جمع شده و تپه‌های شنی بوته‌زاری<sup>(۱۳)</sup> تشکیل می‌دهند. این تپه‌ها در محیط‌های بادخیز که پوشش گیاهی تنک و کم پشت بوده و خاک فرسایش پذیر دارند، مشاهده می‌شوند.



شکل (۳): جریان افقی رسوبات بادی تابعی است از نسبت میانگین اندازه شکاف‌های عاری از پوشش به ارتفاع گیاهان. (خط تیره - پایین) نشان می‌دهد که چگونه جریان رسوبات در حضور یک لایه پوشش گیاهی دست نخورده در هر اکوسیستم متفاوت است. (خط خاکستری - بالایی) نشان می‌دهد که چگونه جریان رسوبات ممکن است در حضور یک آشفتگی، که اکثر پوشش گیاهی را حذف کرده است، متفاوت باشد.

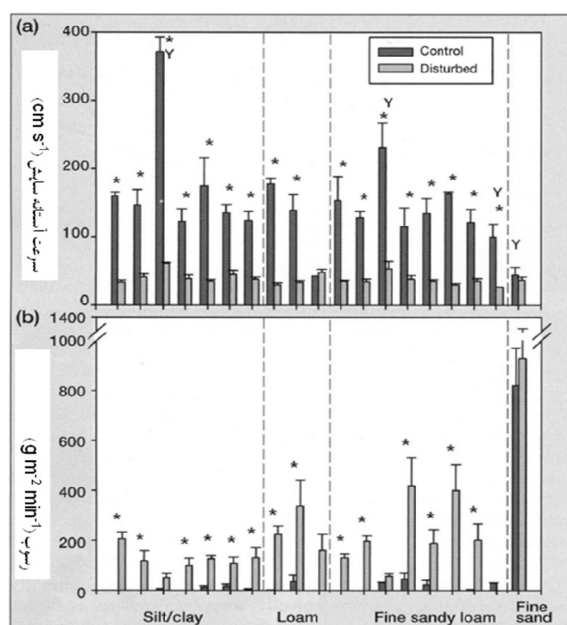
روابط متقابل پیچیده بایستی از نقطه نظر نقش نسبی شان در فرآیندهای بادی در همه مقیاس‌ها، مدنظر قرار گیرند.

### فرسایش بادی در مقیاس فضای اطراف گیاهان

منظور از فضای گیاهی، فضای بین گیاهان و همچنین فضای زیر تاج پوشش گیاهان است. انتقال بادی ذرات خاک در واقع یک مکانیسم غیر بیولوژیکی است که ذرات خاک را هم در داخل و هم به خارج محیط‌هایی که پوشش گسسته‌ای دارند جابه‌جا می‌کند. فرسایش‌پذیری خاک در این مقیاس، به دو عامل بستگی دارد، مقاومت خاک سطحی در برابر فرسایش و همچنین توانایی باد برای رسیدن به سطح خاک. مقاومت در برابر فرسایش توسط دو عامل تعیین می‌شود، مقاومت خاک و حضور محافظ‌های سطح خاک، مانند سنگ‌ها، باقیمانده گیاهان<sup>(۸)</sup>، و پوسته‌های فیزیکی<sup>(۹)</sup> و بیولوژیکی<sup>(۱۰)</sup> خاک (Gillette, et al., ۲۰۰۶; Okin, et al., ۱۹۹۷). سنگ‌ها و باقیمانده گیاهان به اندازه کافی بزرگ هستند که در برابر باد مقاومت کنند. به همین دلیل آنها قوی‌ترین محافظ خاک بوده و زمانی تشکیل می‌شوند که سیلت و رس در حضور رطوبت به هم پیوسته شده و سپس خشک شوند. آن‌ها تا زمانی می‌توانند سطح خاک را محافظت کنند که شکستگی و آشفتگی در سطح آن‌ها اتفاق نیافتد. حتی اگر زمانی در این خاک‌ها آشفتگی و شکستگی بوجود آید، این خاک‌ها نسبت به خاک‌هایی که از ذرات شنی و درشت‌تر تشکیل شده‌اند، مقاومت بیشتری در برابر فرسایش بادی از خود نشان خواهند داد.

پوسته‌های بیولوژیکی خاک، از سیانوباکتری‌ها، گل‌سنگ‌ها و خزها تشکیل شده است، که با ترشح موادی چسبناک ذرات خاک را به همدیگر چسبانده و به سطح خاک استحکام می‌بخشند. در نتیجه اندازه توده خاک افزایش یافته و مقاومت خاک را در برابر نیروی برشی<sup>(۱۱)</sup> باد، افزایش می‌دهد (Belnap and Gillette, ۱۹۹۷). نوع پوشش گیاهی، میزان پوشش و طرز استقرار آن بیشترین تأثیر را بر توانایی باد برای رسیدن به سطح خاک دارد. لکه‌ای بودن و طبیعت دینامیک پوشش گیاهی در مناطق خشک منجر می‌شود که انتقالات ذرات توسط باد در طول زمان و مکان بسیار ناهمگن باشد. میزان موادی که توسط باد حرکت می‌کنند به سه عامل بستگی دارد. اول به اندازه شکاف‌های عاری از گیاهان که باد در آن آزادانه حرکت می‌کند

به کاهش نفوذپذیری آب در خاک می‌شود. میزان این ترکیبات به نوع پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک، شدت آتش‌سوزی، و مدت زمان آتش‌سوزی بستگی دارد (DeBano, ۲۰۰۰). این نفوذناپذیری ناشی از آتش‌سوزی، نیروی چسبندگی بین ذرات خاک، که در حضور رطوبت اتفاق می‌افتد، را به شدت کاهش می‌دهد. این نفوذناپذیری، فرسایش‌پذیری خاک را افزایش می‌دهد؛ چرا که باعث کاهش شدید در سرعت سایش آستانه شده و در نهایت، فرسایش پس از آتش‌سوزی را به وجود می‌آورد (Whicker, et al., ۲۰۰۲; Ravi, et al., ۲۰۰۷).



شکل (۴): (a) سرعت‌هایی از باد که در آن رسوبات از سطح خاک کنده می‌شوند (TFV). به طوری که، ارزش عددی بالاتر نشان‌دهنده این است که خاک با ثبات‌تر است. (b) جریان افقی رسوبات بادی؛ به طوری که، ارزش عددی بالاتر نشان‌دهنده خاک بی‌ثبات‌تر و تولید رسوب بیشتر است. \* نشان‌دهنده معنی‌داری آماری است ( $P < 0.05$ ). "Y" نشان‌دهنده این است که سرعت‌های باد که بوسیله تونل‌های باد تولید شد نتوانسته‌اند سطح خاک را در نمونه‌های «کنترل» آشفته کنند.

پوشش گیاهی و جریان‌های بادی در کویرها ارتباطات مهم و متقابلی دارند (شکل ۵). جریان‌های بادی توزیع و پراکنش مجدد رسوبات، از دست رفتن ذرات خاک، عناصر ریزمغذی موجود در ریزگردها را تحت کنترل خود دارند؛ در نتیجه، بر میزان پراکنش

اصولاً، موادی که دچار جهش شده‌اند و وزن قابل توجه و سرعت بالایی دارند، بنابراین اثرات مخرب قابل ملاحظه‌ای بر پوشش گیاهی خواهند داشت؛ از جمله دفن شدن گیاهان، بیرون زدن بافت‌های زیرزمینی گیاهان مانند ریشه<sup>(۴)</sup>، خراشیدگی بافت‌های گیاهان و ریزش برگ‌ها و تبدیل علفزارها به بوته‌زارها (Okin, et al., ۲۰۰۶). ذرات ریزتر خاک که به وسیله باد حرکت می‌کنند (مانند سیلیت و رس)، حاوی بیشترین ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداری آب و همچنین حاصلخیزی خاک هستند (Toy, et al., ۲۰۰۲). برخی از این ذرات ریز بوسیله پوشش گیاهی به تله افتاده و در تشکیل جزیره‌های حاصلخیز شرکت می‌کنند (Raupach, et al., ۲۰۰۱). این پدیده در اکثر مناطق خشک مشاهده می‌شود. به علاوه، ذرات ریز و مواد معدنی همراه آن با نفوذ در بین قلوه سنگ‌ها به خاک منطقه اضافه می‌شوند (Reheis, et al., ۲۰۰۹). این در حالی است که در مناطق منشأ این ذرات، این پدیده موجب زوال حاصلخیزی خاک و کاهش ظرفیت نگهداری آب موجود در خاک می‌شود (Li, et al., ۲۰۰۷, ۲۰۰۸).

از دست رفتن ذرات ریز سطح خاک اثرات فوری بر پوشش گیاهی ندارد چرا که این اثر بیشتر در لایه بالایی ریشه اتفاق می‌افتد. با این حال، پیامدهای این زوال برای استقرار پوشش گیاهی به دلیل وابستگی شدید جوانه‌ها به منابع خاک و آب در سطحی‌ترین لایه خاک، بسیار چشمگیر خواهد بود.

بسیاری از فاکتورهایی که منجر به فرسایش بادی می‌شوند، به شدت تحت تأثیر آشفته‌گی‌ها و دست‌خوردگی‌های سطح خاک هستند. چرای دام موجب می‌شود تا پوسته‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک شکسته شده (Nash, et al., ۲۰۰۴) و پوشش گیاهی رو به نابودی برود (Neff, et al., ۲۰۰۸). همچنین وسایط نقلیه بیابانی و برون‌راهی و فعالیت‌های نظامی پوشش گیاهی را تخریب کرده و خواص سطح خاک رادر فضای اطراف گیاهان، به‌ویژه پوسته‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک را به شدت تحت تأثیر خود قرار می‌دهند (شکل ۴)، (Belnap and Gillette, ۱۹۹۷; Breshears, et al., ۲۰۰۹). اگر چه ممکن است آتش‌سوزی‌ها نسبت به چرای دام و فعالیت‌های تفریحی محدوده کمتری را تحت تأثیر قرار دهند، اما آتش‌سوزی به‌طور خارق‌العاده‌ای فرسایش بادی را تشدید می‌کند (Whicker, et al., ۲۰۰۹; Breshears, et al., ۲۰۰۲). سوزاندن پوشش گیاهی مقادیر بسیار زیادی از ترکیبات آلی را آزاد کرده که منجر

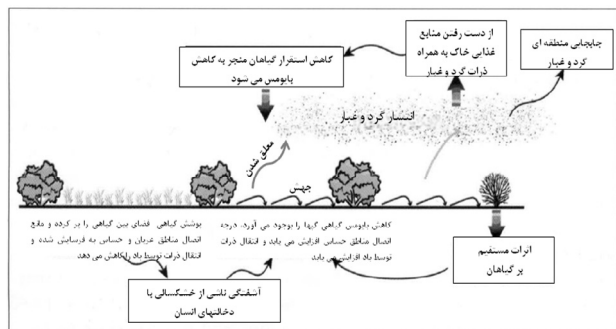
سوی دیگر، این آب شدن برف‌ها توسط ریزگردها منجر به کاهش کل ذخایر آبی و یا ذخیره آب در فصول کم آب، به ویژه در مناطقی که کمبود آب به طور فصلی وجود دارد، خواهد شد.



شکل (۶): برف‌های غبار گرفته بر روی کوه سوپریش در کلرادو، می ۲۰۰۷.

علاوه بر اثر بر اقلیم کره زمین، ریزگردها نقش مهمی در کنترل چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و پراکنش پاتوژن‌ها در مقیاس منطقه‌ای و جهانی بازی می‌کنند. در مقیاس جهانی، عناصر غذایی به مناطق دیگر حمل شده و موجب شکوفایی پلانکتون‌ها در اقیانوس‌ها شده و در نهایت جذب دی اکسیدکربن از اتمسفر را افزایش می‌دهند (Jickells, et al., ۲۰۰۵). در مقیاس منطقه‌ای، تحقیقات مختلفی وجود دارند که پیامدهای نشست ریزگردها را بر چرخه مواد غذایی اکوسیستم‌های آبی و خشکی مطالعه کرده‌اند. به طور کلی در اکوسیستم‌های مناطق گرمسیری یک زوال و از دست رفتگی مواد شیمیایی خاک به طور دائمی در جریان است. در این مناطق تخلیه فسفر و کاتیون‌های پایه خاک اتفاق می‌افتد که ریزگردها به طور بسیار مؤثری این تخلیه را جبران می‌کند. مثلاً انتقال ریزگردهای صحرای آفریقا به حوزه آمازون نقش بسیار مهمی در جبران عناصر غذایی از دست رفته ایفا می‌کند (Koren, et al., ۲۰۰۶). مطالعات مشابه نشان از جبران از دست رفتگی عناصر ضروری گیاهان در هاوایی، که هوازگی شدیداً سبب از دست رفتن خاک می‌شود، توسط ریزگردها دارد (Chadwick, et al., ۱۹۹۹). در مناطق معتدله نیز انتقال و ترسیب ریزگردها برای حیات اکوسیستم‌ها ضروری است. به عنوان مثال، تجمع ریزگردها در سطوح بایئات فلات کلرادو موجب افزایش موجودی عناصر غذایی کم مصرف<sup>(۱۸)</sup> و پرمصرف<sup>(۱۹)</sup> به ویژه فسفر و منیزیم شده است (Reynolds, et

پوشش گیاهی در سطح منطقه تأثیر می‌گذارند. از سوی دیگر، میزان و پراکنش پوشش گیاهی، درجه و الگوهای جریان‌های بادی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. این بازخورها در هر محیطی حتی در مناطق که پوشش گیاهی غنی دارند ممکن است اتفاق افتاده و مسئول تخریب سرزمین به طور زنجیروار در اثر آشفستگی و دست‌خوردگی‌های محلی یا منطقه‌ای هستند (Peters, et al., ۲۰۰۷). از سوی دیگر، ریزگردهای برخاسته از کویرها، به ویژه آن‌هایی که ناشی از آشفستگی‌ها و دست‌خوردگی‌ها هستند، می‌توانند اثراتی بحرانی برای اکوسیستم‌های سر راه خود به ارمغان بیاورند.



شکل (۵): بازخورهای اولیه بین کارکردهای اکوسیستم، فرسایش بادی، و ساختار اکوسیستم.

### پیامدهای ریزگردها در مقیاس جهانی

جابه‌جایی ذرات خاک در مقیاس جهانی نقشی اساسی در سیستم کره زمین بازی می‌کند. اگرچه تأثیر ریزگردها بر اقلیم کره زمین کاملاً شناخته شده نیست، اما ریزگردها تأثیر بسیار مهمی بر اقلیم کره زمین دارد. در مقیاس منطقه‌ای، ریزگردها یک اثر بنیادی بر توازن تابشی اتمسفری و همچنین غلظت «هسته‌های تراکم ابرها»<sup>(۱۵)</sup> دارد که هر دوی این‌ها می‌توانند اقلیم کره زمین را تحت تأثیر قرار دهند. این تأثیر از طریق اثر بر دمای سطح زمین و الگوهای پراکنش بارندگی عمل می‌کند (Yoshioka, et al., ۲۰۰۷). ریزگردهایی که بر روی کوه‌های یخی در یخچال‌های واقع در ارتفاعات می‌نشینند، بازتاب<sup>(۱۶)</sup> برف را کاهش داده و منجر به آب شدن سریعتر پوشش برف خواهد شد (شکل ۶؛ Stelzer, et al., ۲۰۰۹; Painter, et al., ۲۰۰۷). در نهایت، سطحی از خاک پدید خواهد آمد که تابش‌های خورشید را بیشتر جذب کرده و به صورت انرژی گرمایی به اتمسفر باز خواهد گرداند. این یک نگرانی بسیار جدی بر اقلیم کره زمین است. از

ریزگردها را در مقیاس محلی تولید می‌کنند که بر روی تصاویر ماهواره‌ای نیز قابل مشاهده‌اند (Prospero, et al., ۲۰۰۲). در آمریکای جنوبی نیز اوضاع به همین منوال است. به نظر می‌رسد که استفاده‌های انسان از اراضی نیمه‌خشک برای چرای دام نرخ نشست ریزگردها را در قرن بیستم نسبت به قرن نوزدهم به شدت افزایش داده است (McConnel, et al., ۲۰۰۷). اگر چه ممکن است نقش انسان در انتشار و ته‌نشست ریزگردها در مقیاس جهانی محدود باشد، اما به نظر می‌رسد که در مقیاس محلی و منطقه‌ای این پدیده ناشی از تصمیم‌گیری‌های غلط در زمینه تغییر کاربری اراضی است. در این صورت ممکن است انسان‌ها به طور غیرمستقیم مسئول نابسامانی‌های کلان، اما ناشناخته، ایجاد شده در چرخه هیدرولوژی و بیوژئوشیمیایی جهانی باشند.

### پیش‌بینی آینده ریزگردها و نتایج آن

در آینده تغییرات محیط‌زیستی مختلفی در مناطق خشک وجود خواهد آمد. این تغییرات به‌طور مستقیم و هم به طور تشدیدشونده‌ای جریان‌ات ریزگردها را در مقیاس‌های مختلف تحت تأثیر قرار خواهند داد. مدل‌های شبیه‌سازی شده برای تغییرات اقلیمی نشان از افزایش دما در سطح جهانی (Seager, et al., ۲۰۰۷) و همچنین افزایش بارندگی برای برخی از مناطق خشک دارد. این تغییرات می‌تواند موجب افزایش پوشش گیاهی، به اصطلاح سبز شدن در برخی مناطق شود؛ اما اکثر مناطق احتمالاً کاهش بارندگی را تجربه خواهند کرد. تا سال ۲۰۵۰، افزایش دما به تنهایی موجب خواهد شد تا میانگین رطوبت خاک در مناطق جنوب غربی آمریکا به میزان بسیار ناچیزی برسد (Seager, et al., ۲۰۰۷)، میزانی کمتر از آن چیزی که این مناطق در زمان طوفان‌های ریزگردها در دهه ۱۹۳۰ تجربه کرده‌اند (Pulwarty, et al., ۲۰۰۵). این کاهش رطوبت خاک موجب کاهش پوشش گیاهی محافظ خاک، کاهش قدرت احیا خاک پس از دست‌خوردگی و در نتیجه افزایش ریزگردها از سطح خاک خواهد شد. کاهش رطوبت خاک همچنین بدین معنی است که مواد قابل اشتعال خشک‌تر و آماده‌تری جهت آتش‌سوزی وجود خواهد داشت. در این زمینه، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که آتش‌سوزی‌های طبیعی در غرب آمریکا هم از نظر تعداد و هم از نظر شدت، افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت (Ryan, et al., ۲۰۰۸). این بدین

تجمع و ترسیب ریزگردها در دراز مدت منجر به پیدایش لایه‌ای خاک به نام بادرفت<sup>(۲۰)</sup> می‌شود که از نظر کشاورزی حاصلخیز است (Pye, ۱۹۸۷).

اهمیت ریزگردها در چرخه‌های جهانی بیوژئوشیمیایی سوالات فراوانی در زمینه بزرگی، توزیع و نواسانات جریان ریزگردها در سراسر کره زمین به‌وجود می‌آورد. این مسئله باعث شده تا تلاش‌های متعددی در راستای کمی کردن توزیع و پراکنش منشاهای ریزگردها در جهان صورت بگیرد. به‌طور کلی، ریزگردهای ناشی از آشفستگی و نابسامانی‌های ایجاد شده توسط انسان و یا وقایع اقلیمی شدید از جمله خشکسالی‌ها، بخش عظیمی از حدود یک سوم تا یک دوم کل بار ریزگردها اتمسفر را به خود اختصاص داده است (Tagen and Fung, ۱۹۹۵). امروزه اهمیت جریان‌ات ریزگردها چه از جهت مثبت و یا چه از زاویه اثرات منفی آن مورد توجه محققان قرار گرفته و سوالات مهمی از جمله بزرگی جریان‌ات ریزگردها، توزیع و دگرگونی آن‌ها پیش روی شان گذارده شده است. آن‌ها در تلاش هستند تا بتوانند هر کدام از این موارد را کم کرده و یا اینکه روند آن را در آینده، پیش‌بینی کنند. مدلسازی‌های متعدد نشان می‌دهد که جریان‌ات ریزگردهای سطح کره زمین به وسیله کویرهای بیکران شمال آفریقا، آسیا و خاورمیانه کنترل می‌شوند (Tanaka and Chiba, ۲۰۰۶). به نظر می‌رسد که این انتشار ریزگردها به خاطر زمین‌های کشاورزی رها شده و مناطق فرا خشک<sup>(۲۱)</sup> باشد که در سطح جهان پراکندگی وسیعی داشته و میزان انتشار ریزگردها در آن‌ها به عوامل اقلیمی بستگی دارد.

به نظر می‌رسد انتشار ریزگردها از نواحی نیمه‌خشک بیشتر تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی ناشی از دخالت انسان باشد. به عنوان مثال در مناطق نیمه‌خشک چین، شواهد کافی وجود دارد که فرسایش بادی تحت تأثیر چرای دام‌ها است (Liu, et al., ۲۰۰۷). مطالعه لایه‌های مختلف رسوبات و همچنین یخ‌ها در جنوب و شمال آمریکا طی ۲۰۰-۱۰۰ سال گذشته نشان می‌دهد که فعالیت‌های بشر ته‌نشست ریزگردها را افزایش داده است. در غرب آمریکا، تحقیقات نشان می‌دهد که بار ریزگردهای ناشی از کوه‌های سن‌خوان<sup>(۲۲)</sup> در کلرادو ۵۰٪ بیشتر از میزان طبیعی آن در سال ۱۹۰۰ است، زمانی که اسکان جمعیت‌های انسانی و چرای بی‌رویه دام به شدت افزایش یافت (Neff, et al., ۲۰۰۸). مزارع رها شده کتان در تگزاس و آریزونا و پادگان‌های نظامی در تگزاس و کالیفرنیا دائماً طوفان‌هایی از

عمق و در نهایت از بین رفتن پوشش گیاهی می‌شود. همچنین، تخلیه سفره‌های زیرزمینی منجر به ایجاد مناطق بسیار وسیعی حاوی خاک‌های بسیار حساس به فرسایش شده است (Elmore, et al., ۲۰۰۸). بلنک<sup>(۳۷)</sup> و همکاران تأثیر ریزگردها بر پوشش گیاهی را از منظری خاص مورد توجه قرار داده‌اند، آن‌ها دریافتند که ریزگردها منتقل شده از پلایاها<sup>(۳۸)</sup> (مانند بستر دریاچه‌های خشک شده) که از نظر نیترات و دیگر عناصر غذایی غنی هستند، شرایط را جهت ورود گونه‌های مهاجم مهیا می‌کنند (Blank, et al., ۱۹۹۹).

تبدیل جوامع گیاهی چند ساله به جوامعی که غالب گیاهان آن یکساله هستند، در سطح جهان به شدت در حال افزایش است. این مناطق در نتیجه آتش‌سوزی‌ها، رها شدن زمین‌های کشاورزی، چرای بی رویه دام‌ها و دیگر فعالیت‌هایی که منجر به دست‌خوردگی سطح خاک می‌شوند، ایجاد می‌شوند (D Antonio and Vitousek, ۱۹۹۲). اصولاً در سال‌های پر باران پوشش گیاهی یکساله برای تثبیت خاکی کافی بوده و ممکن است نسبت به گیاهان چند ساله نیز حفاظت بهتری از خاک داشته باشند. اما، در سال‌های خشک و کم باران گیاهان علفی یکساله قادر به جوانه زنی نبوده و یا پس از مدت کوتاهی از جوانه‌زنی خواهند مرد و سطح خاک بدون پوشش گیاهی و حساس به فرسایش رها خواهد شد. در مناطقی که غالبیت با گونه‌های یکساله است چرخه‌های آتش‌سوزی نیز تشدید خواهند شد. در سال‌های پر باران، این گراس‌های یکساله سوخت کافی برای ایجاد آتش‌سوزی در سال‌های خشک بعدی تولید خواهد کرد که به دنبال آن خاک‌های حساس به فرسایش پس از آتش‌سوزی به جا خواهند ماند.

تغییر اقلیم و تغییر در کاربری اراضی از مهمترین فاکتورهای مؤثر بر ریزگردها هستند. اگر فاکتورهای مؤثر بر انتشار ریزگردها چه از نظر زمانی و چه از نظر مکانی همزمان شوند، انتشار ریزگردها به طور فزاینده‌ای تشدید خواهد شد. به عنوان مثال رانندگی برون‌راهی موجب کاهش زیست توده و پوشش گیاهی می‌شوند (Sharifi, et al., ۱۹۹۹). وقتی این مسئله در زمانی اتفاق بیافتد که خاک رطوبت بسیار کمی داشته باشد، کاهش پوشش گیاهی نیز بسیار بیشتر مشاهده خواهد شد و در نهایت فرسایش بیشتری مورد انتظار خواهد بود. مورد دیگری از اثرات تشدیدشونده زمانی اتفاق می‌افتد که گیاهان چند ساله با گیاهان یکساله جایگزین شوند. فرسایش‌پذیری ایجاد شده ناشی از

معنی است که پس از آتش‌سوزی خاک‌های عریان‌تر و نفوذناپذیرتری خواهیم داشت که در نهایت انتشار ریزگردها تشدید خواهد شد (Whicker, et al., ۲۰۰۲; Ravi, et al., ۲۰۰۷).

در سرتا سر جهان، بهره‌برداری انسان از مناطق خشک، که حدود ۴۱ درصد کل سطح خشکی‌ها هستند، افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. در حال حاضر، بیش از ۲ میلیارد نفر برای حیات و تغذیه خود به این مناطق وابسته‌اند (MA, ۲۰۰۵) و مهم‌تر اینکه بیشتر نرخ رشد جمعیت جهان نیز مربوط به این سرزمین‌های کم آب است (Reynolds, et al., ۲۰۰۷). به‌عنوان مثال، پیش‌بینی می‌شود که جمعیت در جنوب آریزونا و کالیفرنیا از ۲۵ میلیون به ۳۸ میلیون در سال ۲۰۱۵ برسد (Pulwarty, et al., ۲۰۰۵). این افزایش در اسکان و بهره‌برداری از این سرزمین‌ها باعث از دست رفتن بیش از پیش پوشش گیاهی محافظ، تخلیه خاک از باقیمانده گیاهان، تخریب پوسته‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک شده و در نتیجه شاهد افزایش بیش از پیش ریزگردها از مناطق آشفته و دست‌خورده خواهیم بود.

فعالیت‌های تفریحی برون-راهی<sup>(۳۳)</sup> از دیگر عوامل مؤثر بر انتشار ریزگردها است. به طور مثال، این فعالیت‌ها فقط در جنوب کالیفرنیا از حدود صفر در سال ۱۹۶۰ به حدود ۱۰ میلیون نفر در سال ۲۰۰۶ رسیده‌اند. اگر این رانندگان در هر روز ۳۲ کیلومتر رانندگی کنند، حدود ۲/۷ تن گرد و غبار در سال تولید می‌کنند (Dyck and Stukel, ۱۹۷۶; Forman, et al., ۲۰۰۳). توسعه منابع جدید انرژی از قبیل انرژی باد و انرژی خورشیدی نیز تا حدودی نگران‌کننده است. این فعالیت‌ها منجر به از دست رفتن پوشش گیاهی و محافظت‌کننده‌های خاک از طریق پاک‌تراشی پوشش گیاهی در این محل‌های تولید انرژی می‌شوند. دیگر فعالیت‌ها از قبیل استقرار خطوط لوله‌های آب و انرژی و تردد در جاده‌های خاکی نیز افزایش انتشار ریزگردها را به دنبال خواهد داشت. از سوی دیگر، تقاضا برای آب در مناطق خشک به‌طور چشمگیری در حال افزایش است. تقاضاهایی که منجر به انتقال آب بین حوزه‌ای یا پمپ کردن آب از دریاچه‌های کم عمق شده و منجر به خشکیدن این دریاچه‌ها شده‌اند، این همان چیزی است که در دریاچه ایبی<sup>(۳۴)</sup> در چین، دریاچه آرال<sup>(۳۵)</sup> در ازبکستان، و دریاچه اونس<sup>(۳۶)</sup> در آمریکا اتفاق افتاده است. این تقاضاها همچنین منجر به تخلیه سفره‌های آب زیر زمینی کم



مناطق حساس را مدیریت کرده و میزان تولید ریزگردها را به حداقل ممکن کاهش دهند (Okin, et al., ۲۰۰۹).

دست‌خوردگی در این مناطق به مراتب بیشتر از فرسایش‌پذیری در مناطق پوشیده از گیاهان چند ساله است (Sharifi, et al., ۱۹۹۹).

### یادداشت‌ها

۱. Aeolian
۲. Disturbance
۳. Surface creep
۴. Saltation
۵. Suspension
۶. Dust deposition
۷. Threshold Friction Velocity
۸. Plant litter
۹. Physical crusts
۱۰. Biological Crusts
۱۱. Shearing forces
۱۲. Connectivity
۱۳. Sand dunes
۱۴. Pedastaling
۱۵. Condensation nuclei
۱۶. Albedo
۱۷. Sopris
۱۸. Micronutrients
۱۹. Macronutrients
۲۰. Loess soils
۲۱. Hyperarid
۲۲. San Juan
۲۳. Offroad Recreational Activities
۲۴. Aibi
۲۵. Aral
۲۶. Owens
۲۷. Blank
۲۸. Playa

به طور خلاصه، انتظار می‌رود که در آینده انتشار ریزگردها با شدت بیشتر و طوفان‌های سهمگین‌تری در مناطق خشک کره زمین اتفاق بیافتد. زیرا در این مناطق، همچنان که دما افزایش می‌یابد، مناطق بیشتری دست‌خورده شده و تخریب می‌شوند، پوشش گیاهی نابود، زمین‌ها شخم زده شده، و پوشش گیاهی چندساله به یک‌ساله تبدیل می‌شود. افزایش انتشار ریزگردها باعث پیامدهای قابل ملاحظه‌ای بر سلامت انسان‌ها و اکوسیستم‌های مستقر در مناطق تحت تأثیر انتشار ریزگردها خواهد شد. برای گریز از پیامدهای بالقوه وحشتناک این سناریوها در آینده نیاز به تجدید نظر در مدیریت مناطق خشک و ارائه یک شیوه جدید است. ما بایستی منشأهای مزمن و بحرانی ریزگردها، که اثرات بالقوه بزرگی در مقیاس‌های مختلف محلی، منطقه‌ای و جهانی دارند، را شناسایی کنیم (Peters, et al., ۲۰۰۷). ما همچنین بایستی دریابیم که چگونه زمان‌بندی، نوع و شدت کاربری‌های اراضی در تولید ریزگردها مؤثرند. چالش اساسی پیش روی اکولوژیست‌ها و دیگر متخصصان محیط‌زیست، مالکان اراضی و تصمیم‌گیران و سیاستگذاران این است که بایستی راهی برای همکاری بین این گروه‌ها بیابند تا بتوانند

### فهرست منابع

- Bagnold, R. A. ۱۹۴۱. The physics of blown sand and desert dunes. London, UK: Chapman and Hall Ltd.
- Belnap, J. & Gillette, D. A. ۱۹۹۷. Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah. *Land Degrad Dev* ۸: ۳۵۵-۶۲.
- Belnap, J.; Reynolds, R.L.; Reheis, M. C. et al. ۲۰۰۹. Sediment losses and gains across a gradient of livestock grazing and plant invasion in a cool semi-arid grassland, Colorado Plateau, USA. *Aeolian Res.* ۱: ۲۷-۴۳.
- Blank, R. R.; Young, J. A. & Allen, F. L. ۱۹۹۹. Aeolian dust in a saline playa environment, Nevada, USA. *J Arid Environ* ۴: ۳۶۵-۸۱.
- Breshears, D. D.; Whicker, J. J. & Zou, C.B., et al. ۲۰۰۹. A conceptual framework for dryland aeolian sediment transport along the grassland-forest continuum: effect of woody plant canopy cover and disturbance. *Geomorphology* ۱۰۵: ۲۸-۳۸.

- Chadwick, O.A.; Derry, L. A. & Vitousek, P. M., et al. ۱۹۹۹. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature* ۳۹۷: ۴۹۱~۹۷.
- Clark, J. S.; Grimm, E. C. & Donovan, J. J., et al. ۲۰۰۲. Drought cycles and landscape responses to past aridity on prairies of the northern Great Plains, USA. *Ecology* ۸۳: ۵۹۵~۶۰۱.
- D Antonio, C. M. & Vitousek, P.M. ۱۹۹۲. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. *Annu Rev Ecol Syst* ۲۳: ۶۳~۸۷.
- DeBano, L.F. ۲۰۰۰. The role of fire and soil heating on water repellence in wildland environments: a review. *J Hydrol* ۲۳۱: ۱۹۵~۲۰۶.
- Dyck, R. I. J. & Stukel, J. J. ۱۹۷۶. Fugitive dust emissions from trucks on unpaved roads. *Environ Sci Technol* ۱۰: ۱۰۴۶~۴۸.
- Elmore, A. J.; Kaste, J. M.; Okin, G. S. & Fantle, M. S. ۲۰۰۸. Groundwater influences on atmospheric dust generation in deserts. *J Arid Environ* ۷۲: ۱۷۵۳~۶۵.
- Field, J. P.; Breshears, D. D. & Whicker, J. J. ۲۰۰۹. Toward a more holistic perspective of soil erosion: why aeolian research needs to explicitly consider fluvial processes and interactions. *Aeolian Res.* ۱: ۹~۱۷.
- Forman, R. T. T.; Sperling, D. & Bissonette, J. A., et al. ۲۰۰۳. Road ecology: science and solutions. Washington, DC: Island Press.
- Gillette, D. A. ۱۹۷۴. On the production of soil wind erosion aerosolshaving the potential for long range transport. *Journal des Recherches Atmospheriques* ۸: ۷۳۵~۴۴.
- Gillette, D. A.; Adams, J. & Endo, A., et al. ۱۹۸۰. Threshold velocities for input of soil particles into the air by desert soils. *J Geophys Res* ۸۵: ۵۶۲۱~۳۰.
- Gillette, D. A.; Fryrear, D. W. & Gill, T. E., et al. ۱۹۹۷. Relation of vertical flux of particles smaller than ۱۰\_ m to aeolian horizontal mass flux at Owens Lake. *J Geophys Res* ۱۰۲: ۲۶۰۰۹~۱۵.
- Goudie, A. S. & Middleton, N. J. ۲۰۰۶. Desert dust in the global system. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Hansen, Z. K. & Libecap, G. D. ۲۰۰۴. Small farms, externalities, and the Dust Bowl of the ۱۹۳۰s. *J Polit Econ* ۱۱۲: ۶۶۵~۹۴.
- Jickells, T. D.; An, Z. S. & Andersen, K. K. et al. ۲۰۰۵. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science* ۳۰۸: ۶۷~۷۱.
- Johnson, V. ۱۹۴۷. Heaven s tableland: the Dust Bowl story. New York, NY: Farrar, Straus.

- Koren, I.; Kaufman, Y. J.; & Washington, R., et al. ۲۰۰۶. The Bodele Depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest. *Environ Res Lett* ۱: ۰۱۴۰۰۵, doi:۱۰.۱۰۸۸/۱۷۴۸-۹۳۲۶/۱/۱/۰۱۴۰۰۵.
- Li, J.; Okin, G. S.; Alvarez, L. J. & Epstein, H. E. ۲۰۰۸. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in a desert grassland of southern New Mexico. *Biogeochemistry* ۸۸: ۷۳-۸۸.
- Li, J.; Okin, G. S.; Hartman, L. J. & Epstein, H. E. ۲۰۰۷. Quantitative assessment of wind erosion and soil nutrient loss in desert grasslands of southern New Mexico, USA. *Biogeochemistry* ۸۵: ۳۱۷-۳۲.
- Liu, L. Y.; Li, X. Y. & Shi, P. J., et al. ۲۰۰۷. Wind erodibility of major soils in the farming-pastoral ecotone of China. *J Arid Environ* ۶۸: ۶۱۱-۶۲۳.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment). ۲۰۰۵. *Ecosystems and human well-being: desertification synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute.
- McConnell, J. R.; Aristarain, A. J. & Banta JR, et al. ۲۰۰۷. ۲۰th-century doubling in dust archived in an Antarctic Peninsula ice core parallels climate change and desertification in South America. *P Natl Acad Sci USA* ۱۰۴: ۵۷۴۳-۴۸.
- Nash, M. S.; Jackson, E. & Whitford, W. G. ۲۰۰۴. Effects of intense, short-duration grazing on microtopography in a Chihuahuan Desert grassland. *J Arid Environ* ۵۶: ۳۸۳-۳۹۳.
- Neff, J. C.; Ballantyne, A. P. & Farnes, G. L. et al. ۲۰۰۸. Increasing Aeolian dust deposition in the western United States linked to human activity. *Nat Geosci* doi:۱۰.۱۰۳۸/ngeo۱۳۳.
- Okin, G. S. ۲۰۰۸. A new model for wind erosion in the presence of vegetation. *J Geophys Res-Earth* ۱۱۳: F۰۲S۱۰.
- Okin, G. S.; Herrick, J. E. & Gillette, D. A. ۲۰۰۶. Multiscale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semiarid environments. *J Arid Environ* ۶۵: ۲۵۳-۲۷۵.
- Okin, G. S.; Parsons, A. J. & Wainwright, J., et al. ۲۰۰۹. Do changes in connectivity explain desertification? *BioScience* ۵۹: ۲۳۷-۲۴.
- Painter, T. H.; Barrett, A. P. & Landry, C. C., et al. ۲۰۰۷. Impact of disturbed desert soils on duration of mountain snowcover. *Geophys Res Lett* ۳۴: L۱۲۵۰۲, doi:۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۷GL۰۳۰۲۰۸.
- Peters, D. P. C.; Sala, O. E. & Allen, C. D., et al. ۲۰۰۷. Cascading events in linked ecological and socio-economic systems: predicting change in an uncertain world. *Front Ecol Environ* ۵: ۲۲۱-۲۴.
- Prospero, J. M.; Ginoux, P. & Torres, O., et al. ۲۰۰۲. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust derived from Nimbus-۷ TOMS absorbing aerosol product. *Rev Geophys* ۴۰: ۱۰۰۲, doi:۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۲RG۰۰۰۰۹۵.

- Pulwarty, R.; Jacobs, K. & Dole, R. ۲۰۰۵. The hardest working river: drought and critical water problems in the Colorado River Basin. In: Wilhite D (Ed). Drought and water crises: science, technology and management. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Pye, K. ۱۹۸۷. Aeolian dust and dust deposits. New York, NY: Cambridge University Press.
- Raupach, M. R.; Woods, N. & Dorr, G., et al. ۲۰۰۱. The entrainment of particles by windbreaks. Atmos Environ ۳۵: ۳۳۷۳~۸۳.
- Ravi, S.; D Odorico, P.; Over, T. M. & Zobeck, T. M. ۲۰۰۴. On the effect of air humidity on soil susceptibility to wind erosion: the case of air-dry soils. Geophys Res Lett ۳۱: L۰۹۵۰۱.
- Ravi, S.; D Odorico, P. & Zobeck, T. M., et al. ۲۰۰۷. Feedbacks between fires and wind erosion in heterogeneous arid lands. J Geophys Res- Biogeo ۱۱۲: G۰۴۰۰۷.
- Reheis, M. C.; Budahn, J. R.; Lamothe, P. J. & Reynolds, R. L. ۲۰۰۹. Compositions of modern dust and surface sediments in the desert Southwest, USA. J Geophys Res-Earth ۱۱۴: F۰۱۰۲۸, doi:۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۸JF۰۰۱۰۰۹.
- Reynolds, R.; Neff, J.; Reheis, M. & Lamothe, P. ۲۰۰۶. Atmospheric dust in modern soil on aeolian sandstone, Colorado Plateau (USA): variation with landscape position and contribution to potential plant nutrients. Geoderma ۱۳۰: ۱۰۸~۲۳.
- Reynolds, J. F.; Smith, D. M. S. & Lambin, E. F. et al. ۲۰۰۷. Global desertification: building a science for dryland development. Science ۳۱۶: ۸۴۷~۵۱.
- Ryan, M. G.; Archer, S. R. & Birdsey, R., et al. ۲۰۰۸. Land resources. In: Walsh M (Ed). The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity in the United States. Washington, DC: US Department of Agriculture.
- Schlesinger, W. H.; Reynolds, J. F. & Cunningham, G. L., et al. ۱۹۹۰. Biological feedbacks in global desertification. Science ۲۴۷: ۱۰۴۳~۴۸.
- Seager, R.; Ting, M. F. & Held, I., et al. ۲۰۰۷. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. Science ۳۱۶: ۱۱۸۱~۸۴.
- Shao, Y.; Raupach, M. R. & Findlater, P. J. ۱۹۹۳. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. J Geophys Res-Atmos ۹۸: ۱۲۷۱۹~۲۶.
- Sharifi, M. R.; Gibson, A. C. & Rundel, P. W. ۱۹۹۹. Phenological and physiological responses of heavily dusted creosote bush (*Larrea tridentata*) to summer irrigation in the Mojave Desert. Flora ۱۹۴: ۳۶۹~۷۸.
- Steltzer, H.; Landry, C. & Painter TH, et al. ۲۰۰۹. Biological consequences of earlier snowmelt from desert dust deposition in alpine landscapes. P Natl Acad Sci USA ۱۰۶: ۱۱۶۲۹~۳۴.

- Stout, J. E. & Zobeck, T. M. ۱۹۹۶. The Wolfforth field experiment: a wind erosion study. *Soil Sci* ۱۶۱: ۶۱۶-۳۲.
- Tanaka, T. Y. & Chiba, M. ۲۰۰۶. A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Global Planet Change* ۵۲: ۸۸-۱۰۴.
- Tegen, I. & Fung, I. ۱۹۹۵. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *J Geophys Res-Atmos* ۱۰۰: ۱۸۷۰۷-۲۶.
- Toy, T. J.; Foster, G. R. & Renard, K. G. ۲۰۰۲. *Soil erosion: processes, prediction, measurement and control*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Whicker, J. J.; Breshears, D. D. & Wasiulek, P. T., et al. ۲۰۰۲. Temporal and spatial variation of episodic wind erosion in unburned and burned semiarid shrubland. *J Environ Qual* ۳۱: ۵۹۹-۶۱۲.
- Utz, E. J.; Kellogg, C. E. & Reed, E. H., et al. ۱۹۳۸. The problem: the nation as a whole. In: Bennett HH and Lowdermilk WC (Eds). *Soils and men. Yearbook of agriculture*. Washington, DC: US Department of Agriculture.
- Yoshioka, M.; Mahowald, N. & Conley, A., et al. ۲۰۰۷. Impact of desert dust radiative forcing on Sahel precipitation: relative importance of dust compared to sea surface temperature variations, vegetation changes and greenhouse gas warming. *J Climate* ۲۰: ۱۴۴۵-۶۷, doi:۱۰.۱۱۷۵/JCLI۴۰۵۶.۱.