

Битва с пустыней



Петр Степаненко

Пустынные и засушливые районы занимают уже 41,3% земной суши, и, несмотря на усилия мирового сообщества, деградация земель на планете продолжается. Китайские ученые научились превращать песок в почву с помощью карбоксиметилцеллюлозы.

Деградация земель, называемая опустыниванием, приобрела глобальный масштаб. На фоне экспоненциального роста населения земли, наряду с дефицитом пресной воды опустынивание может стать главной проблемой человечества в перспективе ближайших 50–70 лет.

Конвенция по борьбе с опустыниванием была принята Организацией Объединенных Наций в 1994 году, и с того времени все страны мира прилагали активные усилия по реализации положений Конвенции.

Однако процесс так и не удалось взять под контроль — пустыня сжирает 50–70 тысяч км² в год. В настоящее время пустынные и другие засушливые районы, находящиеся под угрозой опустынивания, составляют 41,3% площади суши.

В Китае площадь опустыненной земли составляет приблизительно $1,73 \times 10^6$ км², что составляет 18,03% территории страны, а еще $3,1 \times 10^5$ км² проявляет тенденцию к опустыниванию.

Основные подходы

Три основных подхода в борьбе с пустыней — инженерный, химический и биологический. Каждый метод сыграл свою положительную роль.

Инженерный метод состоит в предотвращении смещения песка путем создания барьеров, таких как барьеры

поверхности песка, чтобы вызвать затвердевание поверхностного слоя.

В биологических (растительных) методах песок обычно восстанавливается путем посадки псаммофитов.

Однако ни один из названных методов не способен изменить материальные характеристики песка, превратив его по каким-либо характеристикам в почву.

Разгадка — в экомеханике почвы

Путь к «опочиванию», возможно, открывает недавнее открытие в области экомеханики

Крупномасштабный эксперимент по «опочиванию» пустыни проводится в Китае с 2013 года.

из соломенной шахматной доски и заборы из песка.

Химические методы включают распыление масла, битума или латекса на

поверхности почвы. Китайский исследователь У с группой авторов обнаружили, что механические и экологические свойства почвы тесно взаимосвязаны.



Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) представляет собой либо порошок, либо волокнистое вещество, имеющее белый или бежевый цвет. Хорошо растворяется в воде. Карбоксиметилцеллюлоза или целлюлозогликолевая кислота, имеет формулу $C_6H_7O_8$.



В товарных объемах КМЦ поставляется для буровых растворов, упаковка — полипропиленовые и бумажные мешки весом 20–30 кг.

Почва находится в реологическом состоянии, когда она влажная, и в твердом состоянии, когда сухая, и может легко трансформироваться из одного состояния в другое.

Эти механические свойства почвы наделяют ее двумя экомеханическими признаками: самовосстановления и саморегуляции.

Анализ Y_i показал, что оба атрибута — самовосстановления и саморегуляции — являются необходимыми условиями, чтобы поддерживать бесконечный экологический цикл почвы и служить идеальной средой обитания для растений.

Если два этих атрибута будут потеряны, то почва будет деградировать, и может реализоваться один из двух сценариев: затвердевание или опустынивание. На основании этого открытия, Y_i «опустынил» почву путем ограничения подвижности гранул песка.

Песок в значении, используемом в геологии или технике, существует в «дискретном состоянии», и трение, возникающее между его гранулами, является контактным.

Когда подходящая паста на водной основе добавляется и смешивается с гранулами песка, между гранулами образуется всенаправленное так называемое интегративное трение, благодаря чему песок переходит в «реологическое» состояние влажной почвы.

После испарения содержащейся в пасте воды трение становится «фиксированным», а песок переходит в твердое состояние сухой почвы.

«Грунтованный» песок обладает механическими свойствами природного грунта, который может бесконечное число раз трансформироваться между реологическим и твердым состоянием. Таким образом, «загрязненный» песок приобретает такие же экомеханические

свойства, что и почвенный. Поскольку на песчаные гранулы налагаются необходимые ограничения с помощью водорастворимой пасты, «загрязненный» песок также обладает значительной способностью удерживать воду, питательные вещества и воздух.

Карбоксиметилцеллюлоза

КМЦ, целлюлозогликолевая кислота, $[C_6H_7O_2(OH)_{3-x}(OCH_2COOH)_x]_n$, где $x = 0,08-1,5$ — производная целлюлозы, в которой карбоксиметильная группа ($-CH_2-COOH$) соединяется гидроксильными группами глюкозных мономеров. Является слабой кислотой, растворы бесцветны. Впервые синтезирована и запатентована немецким химиком Янсенем в 1918 году. Внешний вид: светло-бежевый кристаллический порошок. pH (1 % раствор в воде): 7,7.

В качестве загустителя входит в состав зубной пасты, пищевых продуктов (пищевая добавка E469, E466), косметики, лака для волос, слабительных средств. Применяется в производстве клея (например, клея бустилат). Входит в состав моющих средств и наполнителей для аккумуляторов холода. А также может использоваться как полимер для пенообразователей, для улучшения стойкости пены. Глинистые суспензии на основе карбоксиметилцеллюлозы используются при бурении в газовой, нефтедобывающей промышленности, геологических исследованиях, где она выступает как модификатор вязкости и удерживающий воду агент.

Карбоксиметилцеллюлоза натрия представляет собой полиэлектролит, образующийся при взаимодействии хлоруксусной кислоты или ее натриевой соли с щелочной целлюлозой. КМЦ — сополимер β -D-глюкозы и соли β -D-глюкопиранозы 2- O- (карбоксиметил)-мононатрия, связанных β -1,4-гликозидными связями.

Синтез КМЦ делится на две стадии: подщелачивание и этеризация. На первой стадии целлюлоза диспергируется в растворе гидроксида натрия и этаноле. На второй стадии к раствору добавляется хлорацетат натрия.

Основным сырьем для получения технической карбоксиметилцеллюлозы является древесная целлюлоза. Так, сульфитная древесная целлюлоза в виде папки использовалась для получения КМЦ на химкомбинате Каменск-Шахтинска. На ОАО «Полиэкс» (Бийск) был разработан способ получения КМЦ из хлопковой целлюлозы. В мировой практике осуществляется синтез КМЦ из буковой древесины, коры, жома сахарного тростника, гидролизной целлюлозы, отходов вискозных нитей. Также в качестве сырья могут быть использованы отходы производства щелочной целлюлозы, не требующие дополнительной активации.



Рис. 1 . «Опочвенный» песок: идеальная среда обитания для растений. а) различные растения, посаженные в «опочвенный» песок; (b) выращивание риса в «почве» мелкого песка; (c) кукуруза растет в «почвенном» крупном песке ; (d) сладкий картофель, растущий на «почвенном» песке средней крупности; (e) после сбора урожая риса «опочвенный» песок оставался в хорошем состоянии, а водоросли на поверхности «почвы» продемонстрировали, что вязкость [ориг. constraint], созданная в «почве», «не смывается» водой; (f) личинки насекомых появились в «опочвенном» песке.

Становится очевидно, что нет существенной разницы между «почвенным» песком и настоящей почвой с точки зрения их механических и экологических свойств.

Ученые обнаружили, что после того, как песок превращается в «почву», он становится подходящим для роста растений.

Имитация

С 2013 года группа китайских ученых проводит эксперимент по высадке растений на открытом грунте на двух участках (площадью 550 м² и 420 м²) в районе Наньань города Чунцин.

Пустынные условия рельефа были смоделированы в эксперименте путем создания слоя чистого песка толщиной от 15 до 25 см, подстилаемого слоем гравия от 20 до 30 см на земле.

Стоимость «почвенного покрова» в пустыне составляет от 4500 до 6500 \$ за гектар в зависимости от специфики возделываемых культур.

После этого три типа «опочвенных» песчаных насыпок с толщиной 10–20 см, которые были получены путем

смешения песка с модифицированным раствором карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), содержащим 2% модифицированной КМЦ и 5% сложного удобрения

в весовом соотношении 1:0,15, помещали поверх слоя простого песка в отдельные секции.

Три типа коммерчески доступного песка для строительства (чистый речной песок) с различными коэффициентами дисперсности — 1,22, 2,97 и 3,71, без примесей почвы, были подвергнуты «опочвливанию».

В дополнение к речным пескам, три других гранулированных материала (машинный песок из камня, песок, смешанный с машинным песком из

каменя, и песок, смешанный с опилками) также использовались в эксперименте по посадке после «опочвливания».

Разные типы растений (рис. 1а), в частности, рис (рис. 1б), кукуруза (рис. 1в) и сладкий картофель (рис. 1г) были высажены в «опочвенный» песок.

Карбоксиметилцеллюлоза в значительных объемах поставляется для производства буровых растворов.

В каждый год эксперимента растения пережили проливные дожди и долгую непрерывную жару, характерные для климата в китайском Чунцине.

В течение периодов постоянной высокой температуры растения поливали с разными интервалами.

«Опочвывающая паста» была добавлена в «песчаные почвы» лишь раз весной 2013 года, перед началом эксперимента, и после этого в грунт не вносилось никаких дополнительных добавок, за исключением необходимого количества удобрений каждый год с 2014 года.

Было получено по два урожая каждый год, и растения всегда показывали прекрасные результаты на разных «почвах».

В 2014 и 2015 годах проводилось сравнение урожайности кукурузы, картофеля, сладкого картофеля, редьки и рапса с контрольными группами тех же

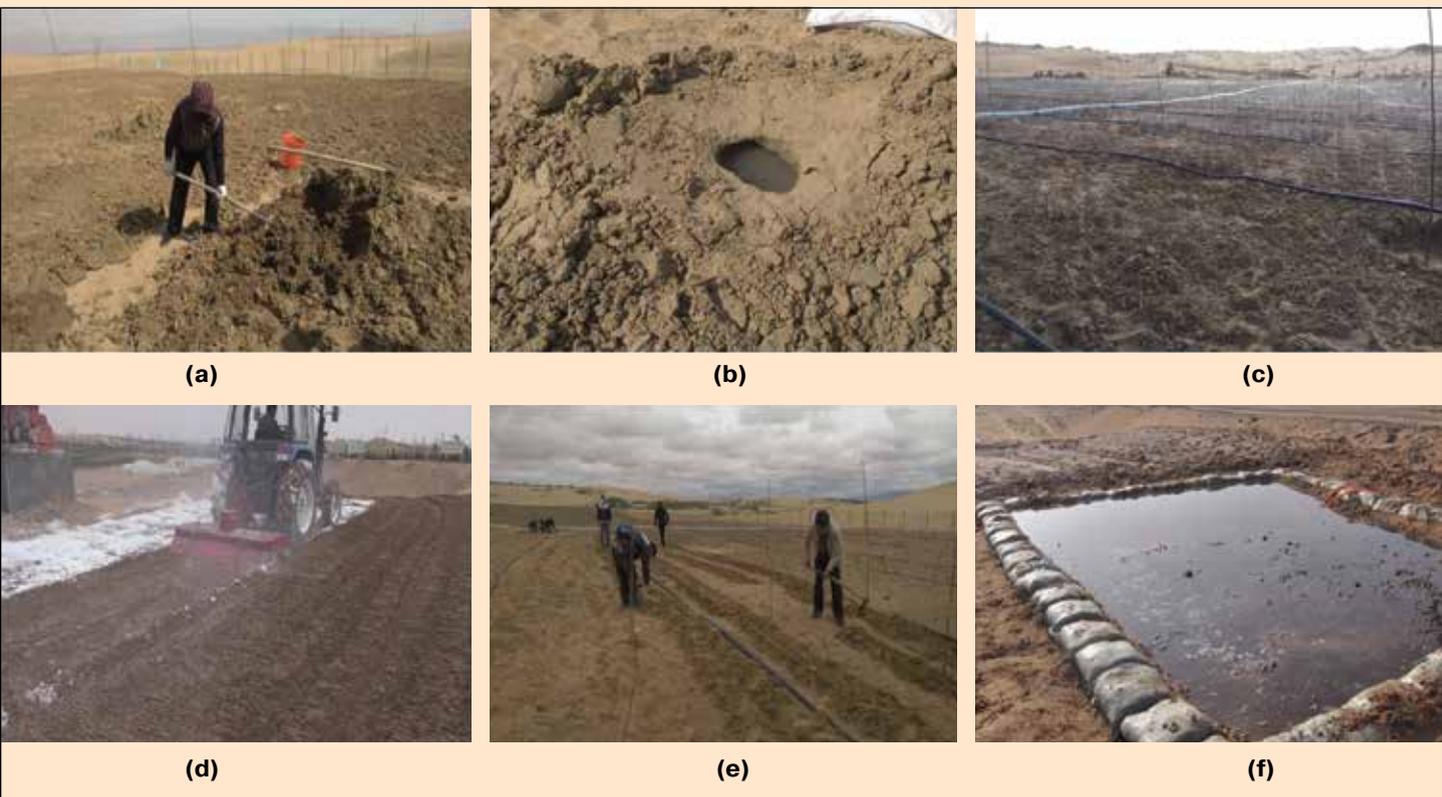


Рис. 2 . «Опочвенный» пустынный песок в пустыне Улан-Бух. а) пустынный песок, который был «опочвен» и нанесен на поверхность пустыни; (b) вода все еще оставалась в отверстии глубиной 20 см в «опочвенном» песке через 24 часа после того, как она была полностью заполнена; (c) пульверизаторная система орошения ; (d) механизированная подготовка песка к «опочиванию» с использованием роторного культиватора; (e) посадка в «опочвенном» песке; (f) рисовое поле, построенное из «опочвенного» песка (стены были построены по краям поля с использованием мешков, заполненных «опочвенным» песком).

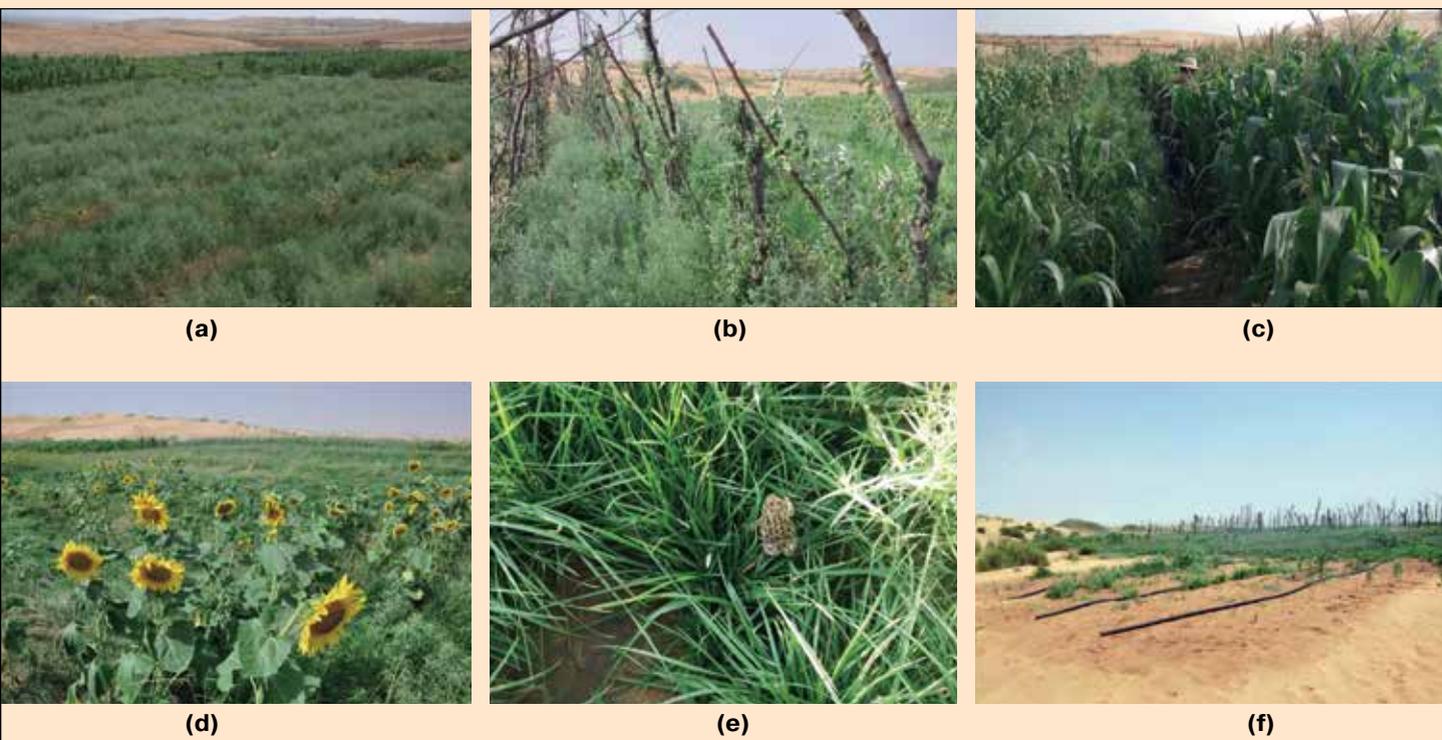


Рис. 3 . Различные виды растений выращивают в «опочвенной» пустыне. а) более 70 видов растений, выращенных в «опочвенной» пустыне; (b) песчаные мармеладные деревья и трава; (c) кукуруза и просо ; (d) подсолнухи и травы; (e) лягушка в траве; (f) для сравнения — изображение растений, выращенных на пустынных землях с использованием тех же методов посева, полива и удобрения, что и в «опочвенном» песке, но без добавления карбоксиметилцеллюлозы.

культур, которые были высажены на расположенных рядом полях из естественной почвы.

Результаты продемонстрировали, что плодородность всех культур на экспериментальном песчаном поле оказа-

Карбоксиметилцеллюлоза входит в состав зубной пасты, пищевых продуктов, косметики, лака для волос, слабительных средств.

лась выше, и, в частности, три корневых культуры (картофель, сладкий картофель, редька) показали урожайность на 50% больше, чем в контрольной «земляной» группе.

Шестилетний эксперимент показал, что «загрязненный» песок не возвращается в свое первоначальное дискретное состояние в результате эрозии, вызванной ливнем.

Напротив, участки, которые поливались чаще (например, участок с рисом), сильно заросли водорослями (рис. 1е).

Эксперимент показал также, что экомеханические свойства «загрязненного» песка улучшались на протяжении всего цикла посадки и сбора урожая, причем «опочвенный» песок становился все более похож на естественную почву.

Через три месяца после сбора первого урожая в новой «почве» уже появились муравьи, дождевые черви, многоножки и личинки насекомых (рис. 1).

Описанный выше эксперимент по посадке подтверждает, что «загрязненный» песок является идеальной средой обитания для растений и что его экомеханические свойства могут сохраняться в течение длительного времени.

Внутренняя Монголия. Пустыня

Эксперимент, начатый в 2013 году, проводился в условиях смоделированного пустынного грунта.

Чтобы проверить выполнимость «почвообразования» в настоящей пустыне, в апреле 2016 года был начат второй крупномасштабный эксперимент — по посадке в «почвенный» песок в пустыне Улан-Бух Внутренней Монголии.

Занимая площадь около 10 000 км², пустыня Улан-Бух располагается на высоте около 1100 м над уровнем моря. Улан-Бух характеризуется небольшим количеством осадков, среднегодовое количество которых составляет всего 102,9 мм, а также сильной ветровой эрозией.

Внутренняя Монголия — один из наиболее сильно опустыненных регионов Китая, который трудно

контролировать, ограничивая деградацию почв.

Экспериментальное поле было расположено в 39°36'32" северной широты, 106°39'02" восточной долготы в пустыне Улан-Бух на высоте 1110 м над уров-

нем моря (рис. 2). Поскольку подземные воды Улан-Бух довольно обильные (резервный объем составляет приблизительно 5,7×10⁹ м³), вся вода, используемая для превращения песка в «почву» и для орошения размещенных в нем растений, была получена из подземных вод.

Содержание добавленного ограничивающего материала, модифицированной карбоксиметилцеллюлозы, в песке составляло от 0,1% до 0,4%.

Плодородность всех культур на «опочвенном» песке оказывается в целом выше, а у картофеля и редьки — выше на 50%.

Песок пустыни и стесняющий материал сначала смешивали с помощью миксера, а затем укладывали на поверхность пустыни слоем толщиной около 10 см (рис. а).

Комплексное азотно-фосфорно-калийное (NPK-) удобрение было добавлено в весовом соотношении 0,3% по отношению к песку.

«Почвенный» песок обладает сильной водоудерживающей способностью (рис. 2б).

В эксперименте использовалась пульверизационная система орошения (рис. 2с).

Для замешивания «почвенного» песка и нанесения его на площадь 2000 м² была необходима крупномасштабная механизированная подготовка грунта. Был использован роторный культиватор (рис. 2г).

С 20 мая 2016 года семена и саженцы приблизительно 50 видов растений, включая *Festuca arundinacea*, кореопсис, пшеницу, кукурузу, подсолнечник, песчаное мармеладное дерево и тополь, были высажены на опытном поле (рис. 2е).

В 2018 году уже более 70 видов растений (семена новых 20, вероятно, были занесены ветром или птицами), растут здоровыми и устойчивыми в полевых условиях (рис. 2а-е), а рост некоторых водорослей на «почве» указывает на то, что возникает новый экологический цикл.

Бабочки, комары и муравьи, а также птицы, мыши и даже лягушки остаются

и живут на экспериментальном поле — понятно, что эти виды ранее нельзя было наблюдать в пустыне. Иногда в поле можно увидеть лисиц и барсуков.

Для определения роли вяжущего агента, карбоксиметилцеллюлозы, на трех участках пустынного грунта, в непосредственной близости от экспериментального поля, были высажены те же виды растений, и к ним применялись те же методы удобрения и мелиорации. Растения на трех контрольных участках росли скудно (рис. 2е) и не сумели противостоять ветряной эрозии.

Улан-Бух — растущая пустыня, а кроме того, поле для эксперимента находилось между двумя песчаными холмами, что создает в зоне эксперимента аэродинамическую трубу, область сильных ветров. Однако «загрязненный» песок в зоне эксперимента успешно предотвратил ветровую эрозию, в то время как

естественные области вокруг за период наблюдений претерпели значительные и явные изменения.

«Опочвенная» песчаная масса, находится ли она в «реологическом», влажном или в твердом, сухом состоянии, не состоит из «дискретных гранул», как песок, и удерживается вместе вязкостью, сравнимой с вязкостью почвы.

Рисовые поля

Когда содержание ограничивающего материала, модифицированной КМЦ, достигает 1,0%, «опочвенный» песок приобретает еще большую способность удерживать воду, становясь таким же непроницаемым, как грязь.

Чтобы попытаться окончательно приручить полезное свойство материала, был построен два рисовых поля (рис. 2ф) и сделана попытка вырастить на них водолубивые растения. О результатах этой части исследования можно будет сказать в 2019 году.

Технология и цена

Технология, разработанная благодаря междисциплинарным исследованиям, объединяющим механику, экологию, почвоведение и ботанику, основанная на принципе «связывания песка» [англ. — constraint principle], проста.

Добавляемый «связывающим» материалом является модифицированная карбоксиметилцеллюлоза,



Внутренняя Монголия — китайская автономия, занимающая площадь 1 181 104 км², или 12 % территории Китая, что по размерам превосходит Францию и Германию, вместе взятые. На западе автономии находятся пять крупных пустынь: Бадын-Джаран, Тэнгэр, Улан-Бух, Му-Ус и Гоби.

разновидность растительной целлюлозы, которая может использоваться в качестве пищевой добавки. Она нетоксична, экологична, экономична и подходит для массового производства.

Небольшое количество (например, 1–5%) модифицированной КМЦ, добавленной в воду, может привести к образованию высоковязкой пасты.

Если будут применены методы механизированной подготовки, такие как ротационное культивирование, работа, связанная с посадкой в «за-

в зависимости от специфики возделываемых культур.

Время вспять

Деградация почвы приводит к глобальным экологическим проблемам, а на образование натуральной почвы в обычных условиях уходят тысячи лет.

Однако с помощью «опочвивания» песок можно превратить в «почву», которая мгновенно становится идеальной средой обитания для растений.

может способствовать развитию многих новых дисциплин и отраслей.

Широкомасштабное применение «опочвивания» песка может способствовать созданию процветающей пустынной экосистемы, которая поможет решить проблему обезлесения, утраты биоразнообразия, изменение климата и дефицита продовольствия.

Проблемы

Основные риски в реализации проекта связаны с возможной чрезмерной эксплуатацией подземных водных ресурсов, поэтому необходимы пролонгированные исследования на различных и обширных территориях.

Необходимо продолжение региональных испытаний в условиях разных широт с последующим солидарным, комплексным планированием и оценкой.

«Опочвивание» пустынь стоит начать с районов, имеющих доступ к подземным или иным водным ресурсам. ■

Широкомасштабное «опочвивание» песка может помочь в решении проблем обезлесения, утраты биоразнообразия, изменение климата и дефицита продовольствия.

грязненный» песок, потребует затрат, сравнимых с обычными при посадке на пахотных землях.

Поскольку содержание ограничивающего материала довольно низкое, а способ подготовки прост, общая стоимость «почвенного покрова» в пустыне составляет от 4500 до 6500 \$ за гектар

По всей видимости, «опочвивание» песка является обратным процессом опустынивания. «Опочвивание» предлагает решение различных проблем: дрейфа песка, плохого удержания воды и, как следствие, враждебности к растениям.

Широкое внедрение «опочвивания» пустынь в ближайшем будущем