НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И АГРОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗА И СЕРЫ В ОРОШАЕМЫХ ПОЧВАХ

Бабаниязов Бабанияз
специалист научно-исследовательского отдела, Туркменский государственный педагогический институт имени Сейитназара Сейди
г. Туркменабат, Туркменистан

Аннотация

В статье на основе современных достижений аграрной и химической науки рассматриваются физико-химические закономерности и агрономическая оценка динамики соединений железа и серы в орошаемых почвах аридных и полуаридных зон, с особым акцентом на условия Туркменистана. Проведен детальный термодинамический и стехиометрический анализ реакций образования и последующего окисления пирита (FeS_2) в гидроморфных почвах. Описаны механизмы микробного восстановления сульфатов, формирования нестехиометрического сульфида железа и его трансформации в дисульфид. Автор детально анализирует экологические и агрономические последствия окисления пирита при изменении гидрологического режима (осушении и аэрации), включая экстремальное подкисление почвенного раствора (pH < 4), активизацию токсичных форм подвижного алюминия (Al^{3+}), ретроградацию фосфатов и ухудшение водно-физических свойств почвы. Предложены рекомендации по непрерывному мониторингу почвенной среды и своевременному проведению химической мелиорации в целях повышения плодородия почв.

Ключевые слова: орошаемые почвы, соединения железа и серы, пирит, окислительно-восстановительный потенциал, сульфатредуцирующие бактерии, агрономия, мелиорация.

1. Введение

В стратегии социально-экономического развития современного Туркменистана особое внимание уделяется устойчивому развитию агропромышленного комплекса, рациональному использованию земельно-водных ресурсов и внедрению передовых достижений естественных наук в агрономическую практику [1, с. 45]. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью теоретического обоснования и прогнозирования физико-химического поведения соединений серы и железа в гидроморфных почвах аридной зоны, где процессы оглеения, сульфатредукции и вторичного подкисления оказывают существенное влияние на плодородие почв [2, с. 78].

Целью работы является анализ термодинамических закономерностей трансформации соединений железа и серы и оценка их влияния на агроэкологическое состояние почвенного покрова.

2. Материалы и методы исследования

Методологическую основу исследования составили положения физической химии почв, термодинамического анализа равновесных гетерогенных систем, а также стехиометрического моделирования окислительно-восстановительных реакций [3, с. 34]. В работе использованы методы системного анализа, математического описания кинетики микробного восстановления сульфатов и трансформации соединений железа в анаэробных и аэробных условиях [4, с. 156]. Информационной базой послужили данные многолетнего мониторинга почвенного покрова орошаемых зон аридных территорий, а также результаты классических экспериментальных исследований отечественных и зарубежных почвоведов и агрохимиков [5, с. 45].

3. Результаты и обсуждение

Почва представляет собой сложную полидисперсную гетерогенную систему, находящуюся в динамическом развитии, которая включает твердую, жидкую и газообразную фазы и характеризуется непрерывно взаимосвязанными физико-химическими, биохимическими и химическими процессами [6, с. 89]. Почвенный покров определяет уровень продуктивности агроценозов и устойчивость биосферы. В условиях интенсивного земледелия и мелиорации в засушливых и полузасушливых климатических зонах (в том числе в зонах орошаемого земледелия Туркменистана) важное значение имеет термодинамический и кинетический анализ реакций, протекающих в почвенных растворах [2, с. 92].

Основная группа таких химических реакций происходит в результате протекания необратимых процессов, сопровождающихся формированием труднорастворимых фаз (осадков), выделением газообразных продуктов либо изменением окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и водородного показателя (pH) [3, с. 115]. В гидроморфных почвах и мелиорируемых массивах одним из классических примеров является цикл сернистых соединений, в частности образование и окисление пирита [4, с. 210].

3.1. Биогеохимическое образование пирита в анаэробных условиях

Образование сульфида железа (FeS_2) в почвах происходит в условиях избыточного содержания органических веществ и сульфатов (в аллювиальных почвах речных пойм, рисовых чеках, болотах, засоленных прибрежных зонах) при участии анаэробных восстановителей, отрицательных значениях окислительно-восстановительного потенциала ($Eh < 0$ мВ) и нейтральной или слабощелочной среде ($pH \approx 6.5$ - 8) [5, с. 140].

В анаэробных условиях в реакции окисления органического вещества (в качестве модели используется углеводный эквивалент CH_2O) сульфатредуцирующие

бактерии (например, Desulfovibrio) используют сульфат-ион в качестве акцептора электронов. Строго уравненная реакция восстановления сульфатов имеет вид:

$$SO_4^{-2} + 2CH_2O + 2H^+ \xrightarrow{\text{Микроорганизмы}} H_2S + 2CO_2 \uparrow + 2H_2O$$

Параллельно протекает реакция восстановления нерастворимых оксидов и гидроксидов железа (III) до растворимых форм двухвалентного железа:

$$4FeOOH + CH_2O + 8H^+ \rightarrow 4Fe^{2+} + CO_2 \uparrow + 7H_2O$$

Взаимодействие образовавшихся ионов Fe^{2+} и сероводорода приводит к формированию осадка моносульфида железа:

$$Fe^{2+} + H_2S \rightarrow FeS \downarrow + 2H^+$$

На завершающем этапе моносульфид железа реагирует с элементарной серой или полисульфидами, образуя термодинамически более устойчивый дисульфид железа — пирит (FeS_2):

$$FeS + S^0 \rightarrow FeS_2 \downarrow$$

Интегральное (итоговое) стехиометрическое уравнение образования пирита, учитывающее стехиометрию вовлечения сульфатов и органического вещества, выглядит следующим образом:

$$2Fe^{2+} + 4SO_4^{-2} + 7CH_2O + 4H^+ \rightarrow 2FeS_2 \downarrow + 7CO_2 \uparrow + 9H_2O$$

3.2. Окисление пирита и трансформация сернокислотных систем при аэрации

При изменении гидрологического режима почвы (осушение, проведение мелиоративных работ, глубокая вспашка) под действием кислорода воздуха окислительно-восстановительный потенциал резко возрастает (Eh > +400 мВ). Процесс протекает с выделением тепла и образованием сильной минеральной кислоты [6, с. 145].

На первом этапе кислород воздуха окисляет сульфидную серу пирита до сульфатов, высвобождая ионы Fe^{2+} и протоны водорода. Точно сбалансированное уравнение данной реакции:

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{-2} + 4H^+$$

В кислых средах при падении значений pH ниже 4 дальнейшее окисление двухвалентного железа до трехвалентного катализируется специфическими хемолитоавтотрофными бактериями Acidithiobacillus ferrooxidans:

$$2Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \xrightarrow{\text{A.ferrooxidans}} 2Fe^{3+} + 2H_2O$$

Образовавшийся высокоактивный ион Fe^{3+} выступает в роли мощного окислителя, атакуя оставшуюся твердую фазу пирита в почвенном профиле:

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{-2} + 16H^+$$

Далее ионы трехвалентного железа гидролизуются в водной среде с образованием труднорастворимых гидроксидов и основных сульфатов железа, в частности ярозита $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$):

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 \downarrow + 3H^+$$

$$3Fe^{3+} + K^+ + 2SO_4^{-2} + 6H_2O \rightarrow KFe_3(SO_4)_2(OH)_6 + 6H^+$$

3.3. Агрономические и экологические последствия окисления пирита

Масштабное образование серной кислоты (H_2SO_4) в почвенном растворе при неконтролируемом окислении пирита вызывает серьезные негативные экологические и агрономические последствия [3, с. 180]:

Экстремальное подкисление почв (Cat clays): Резкое падение показателей pH почвенного раствора до критических значений 2.5 - 3.5 полностью подавляет полезную почвенную микрофлору. Большинство сельскохозяйственных культур (хлопчатник, зерновые, кормовые) в таких условиях погибают.

Токсичность алюминия и тяжелых металлов: В условиях экстремально кисой среды (pH < 4) происходит разрушение почвенных алюмосиликатников, вследствие чего токсичные ионы трехвалентного алюминия (Al^{3+}) и марганца переходят в подвижную жидкую фазу, вызывая глубокий токсикоз корневой системы растений.

Ретроградация фосфатов: Избыток свободных ионов (Al^{3+}) и Fe^{3+} прочно связывает вносимые фосфорные удобрения в труднорастворимые соединения (например, фосфат железа), которые становятся абсолютно недоступными для питания культурных растений:

$$Fe^{3+} + H_2PO_4^- + 2H_2O \rightarrow FePO_4 \cdot 2H_2O \downarrow + 2H^+$$

Ухудшение водно-физических свойств почвы: Избыток сульфат-ионов разрушает почвенный гумус, вызывая цементацию профиля, резкое ухудшение водно-воздушного и теплового режимов.

Необходимость химической мелиорации: Для нейтрализации образующейся серной кислоты требуются научно обоснованные затраты на внесение мелиорантов (карбонатов кальция):

$$H_2SO_4 + CaCO_3 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2 \uparrow$$

Заключение

Физико-химические закономерности формирования и динамики соединений железа и серы, в частности пирита (FeS_2), оказывают определяющее влияние на агроэкологическое состояние орошаемых почв [1, с. 250]. На основе проведенного детального термодинамического и стехиометрического анализа установлено:

1. Образование пирита строго привязано к анаэробным гидроморфным условиям (Eh < 0) и активной жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий.

2. Неконтролируемое осушение и аэрация почв запускают каскад реакций окисления пирита с выделением серной кислоты (H_2SO_4) при участии Acidithiobacillus ferrooxidans.

3. Глубокое подкисление почвенной среды (pH < 4) активирует мобильный токсичный алюминий (Al^{3+}), угнетающий развитие корневых систем агрокультур.

4. Химическое связывание фосфатов в труднорастворимые осадки $FePO_4 \cdot 2H_2O$ резко снижает агрономическую эффективность фосфорных удобрений.

5. Для орошаемых и гидроморфных почв Туркменистана необходим постоянный агрохимический мониторинг и своевременное проведение эффективных мелиоративных мероприятий в целях поддержания стабильного плодородия и устойчивого развития агропромышленного комплекса.

Список литературы

1. Розанов Б. Г. Морфология почв. - М.: Академический Проект, 2004.- 432с.
2. Kowalow R.w. Türkmenistanyň topraklary we olary meliorirlemegiň ýollary.- Aşgabat:Ylym, 2015.
3. Sähetmyradow O., Orazow A. Toprakşynaslyk we agrohimiýa.-Aşgabat: Magtymguly adyndaky Türkmen döwlet uniwersiteti, 2018.
4. Sparks D. L. Environmental Soil Chemistry. 2nd edition. - San Diego: Academic Press, 2003. - 352 p.
5. Ponnamperuma F. N. The Chemistry of Submerged Soils // Advances in Agronomy, 1972, Vol. 24, pp. 29-96.
6. Bigham J. M., Nordstrom D. K. Iron and Aluminum Hydroxysulfates from Acid Sulfate Waters // Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2000, Vol. 40, pp. 351–403.