

**СЕЗОННОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕСИ, КРУПНЫХ КОЛЛОИДОВ И
РАСТВОРЕННЫХ ФОРМ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕЧНЫХ И ОЗЕРНЫХ
ВОДАХ БАССЕЙНА ОЗ.ХАНКА**

**Шулькин В.М., Болдескул А.Г., Катрасов С.В., Луценко Т.Н., Шамов В.В.,
Юрченко С.Г.,**

ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток

Аннотация. Показано, что содержание взвеси и крупных коллоидов в реках бассейна оз. Ханка контролируется водным режимом, а в водах озера взмучиванием донных отложений при ветроволновом воздействии. Уровень содержания крупных коллоидов в озерных водах в 3-10 раз меньше, чем в речных. Концентрация растворенных/коллоидных (<0.45 мкм) форм Fe, Al, Ti и в речных, и в озерных водах определяется содержанием крупных коллоидов. Концентрация Mn в речных водах контролируется соотношением его мобилизации в раствор при восстановительных процессах и разбавлением за счет водного стока. В озерных водах доминирует связывание Mn в твердых фазах с минимальной концентрацией в растворе на протяжении всего года.

Ключевые слова: озеро Ханка, взвесь, крупные коллоиды, элементы-гидролизаты, сезонность

**SEASONALITY OF THE CONTENT OF SUSPENDED SOLIDS, COARSE
COLLOIDS AND DISSOLVED FORMS OF CHEMICAL ELEMENTS IN RIVER AND
LAKE WATERS OF THE KHANKA LAKE BASIN**

**Shulkin V.M., Boldeskul A.G., Katrasov S.V., Lutsenko T.N., Shamov V.V.,
Yurchenko S.G.,**

*Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Vladivostok*

Annotation. It has been shown that the suspended matter and coarse colloid content in the rivers of the Lake Khanka basin is controlled by the water regime, and in lake waters by the resuspension of bottom sediments under wind and wave action. The content of coarse colloids in lake waters is 3-10 times lower than in river waters. The concentration of dissolved/colloidal (<0.45 μm) forms of Fe, Al, and Ti in both river and lake waters is determined by the content of coarse colloids. The concentration of Mn in river waters is controlled by the ratio of its mobilization into solution during reduction processes and dilution due to runoff. In lake waters, Mn binding in solid phases predominates, with minimal concentrations in solution throughout the year.

Keywords: Lake Khanka, suspended matter, coarse colloids, hydrolysate elements, seasonality

Введение. Сезонная изменчивость свойств водных экосистем умеренной зоны является важной характеристикой, определяющей их состояние и функционирование. Это в полной мере относится к химическому составу вод и к содержанию в них взвешенных частиц, которые во многом и определяют качество речных и озерных вод как ресурса. Кроме того, данные по сезонным изменениям состава вод позволяют оценить роль биогеохимических и гидрологических процессов, влияющих на концентрацию химических элементов и соединений в различных компонентах водных экосистем. Озеро Ханка – крупнейшее трансграничное пресноводное озеро на Дальнем Востоке России, является бассейном стока для рек Илия, Спасовка, Мельгуновка, Комиссаровка и ряда более мелких рек, и одновременно источником стока р. Сунгач. Воды озера Ханка и впадающих в него рек являются ценным природным ресурсом и обеспечивают многие виды хозяйственной

активности населения, проживающего в его бассейне. Вместе с тем климатические изменения и антропогенное освоение водосбора за последние 50-60 лет сопровождались рядом проблем в бассейне оз. Ханка [2]. Наиболее очевидной является квазициклическое изменение среднегодового уровня озера [1], которое сопровождается интенсификацией береговой эрозии, затоплением прибрежной зоны и значительным ущербом инфраструктуре [2]. Эвтрофикация вод, сопровождающая интенсификацию сельскохозяйственной деятельности на Приханкайской равнине, также ведет к негативным последствиям в виде вредоносных цветений микроводорослей [4, 5]. Анализ опубликованных в 1990-2020 гг. данных по индексу качества вод и донных отложений северного сектора озера, находящегося на территории КНР, свидетельствует о тенденции улучшения качества вод за этот период, по крайней мере по TN и TP, однако пространственный и временной разброс данных очень велик [4]. Можно констатировать, что причины, контролирующие вариации химического состава, а также содержание взвеси и коллоидов в оз. Ханка и впадающих в неё реках, изучены недостаточно. Целью данной работы является характеристика сезонной изменчивости химического состава вод бассейна оз. Ханка, а также выделение главных факторов, контролирующих пространственные и сезонные вариации состава вод в части касающейся концентрации растворенных форм таких химических элементов как Fe, Al, Ti, Mn, Cu, а также содержания взвеси и крупных коллоидов (0.05-0.45 мкм).

Материалы и методы. Пробы воды отбирали ежемесячно с февраля по ноябрь 2025 в нижнем течении рек Спасовка, Илистая, Мельгуновка, Комиссаровка, а также на трех точках в прибрежной зоне юго-восточной, западной и северо-западной частях озера Ханка (рис.1). Очевидно, что юго-восточная прибрежная зона может находиться под влиянием стока р. Спасовка, тогда как другие точки отбора озерных вод находились за пределами прямого влияния речного стока. Кроме того, в июле 2025 было отобрано 7 проб в центральной части озера. Пробы отбирали из поверхностного 0.3 м слоя вод в предварительно отмытые полиэтиленовые емкости с соблюдением всех предосторожностей во избежание загрязнения. Удельная электропроводность, как мера общей минерализации, температуру, pH, растворенный кислород измеряли зондом AquaRead 5000 непосредственно во время опробования. Пробы доставляли в стационарную лабораторию в течение суток и обрабатывали на следующий день.

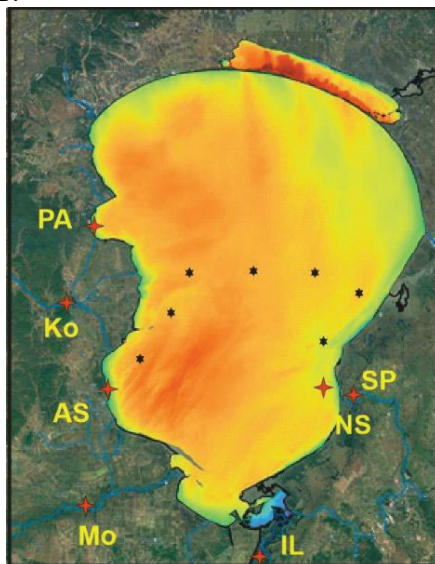


Рис. 1. Расположение станций сезонного мониторинга химического состава вод бассейна оз. Ханка в 2025 г. на фоне распределения индекса NDWI, рассчитанного по композиту снимка Landsat 8 от 30.05.2025; SP – р. Спасовка, IL – р. Илистая, Mo – р. Мельгуновка, Ko – р. Комиссаровка, NS – юго-восточное побережье оз. Ханка, AS – западное побережье (п.

Астраханка), РА – северо-западное побережье (п. Платоново-Александровское), черные значки – места отбора вод озера 29.07.2025

Содержание взвеси определяли гравиметрически после фильтрации 0.5-1.0 л пробы через предварительно взвешенную мембрану Millipore PVDF 47 мм с размером пор 0.45 мкм. При этом первые порции по 50 мл использовали после подкисления HNO_3 для определения концентрации растворенных форм макроионов и Fe, Al, Mn, Ti, Cu методом ИСП-ОЭС. Контроль правильности определения концентрации металлов контролировали анализом холостых проб (фильтратов подкисленной воды MilliQ), стандарта SRLS-6, регулярных параллельных проб. Во всех фильтратах перед подкислением, а также в исходных нефильтрованных водах определяли интенсивность динамического рассеяния света (ДРС) для оценки содержания крупных коллоидов (0.05-0.45 мкм) в фильтратах, исходя из коэффициента $6 \cdot 10^{-5}$ установленного по экспериментам с частицами ПММА [3].

Результаты и обсуждение. Содержание взвеси в реках, впадающих в оз. Ханка, демонстрировало очевидную сезонную изменчивость с минимумом 3-14 мг/л зимой подо льдом, существенным повышением до 30-150 мг/л в зависимости от реки в весеннее половодье или/и летние дождевые паводки, и снижением во время осенней межени (рис. 2а). Максимальное (57-154 мг/л) содержание взвеси наблюдалось в реках Мельгуновка и Комиссаровка в весеннее половодье. В р. Мельгуновка повышенный уровень содержания взвеси (34-58 мг/л) сохранялся на протяжении всего лета. В остальных реках количество взвеси летом колебалось в диапазоне 12-38 мг/л без заметной разницы между водотоками. В сентябре содержание взвеси в реках снижалось до 6-18 мг/л, а к концу осени до 4-10 мг/л (рис. 2а).

Содержание взвеси в озерных водах было, как правило, заметно выше, чем в питающих реках, и колебалось в диапазоне 50-150 мг/л в период открытой воды (с апреля по ноябрь). В это время прибрежные воды юго-восточной части озера характеризовались пониженным уровнем содержания взвеси по сравнению с западным и северо-западным побережьем и открытой частью озера в июле. Однако сезонный ход изменения содержания взвеси в различных частях прибрежной зоны о. Ханка совпадал (рис. 2а).

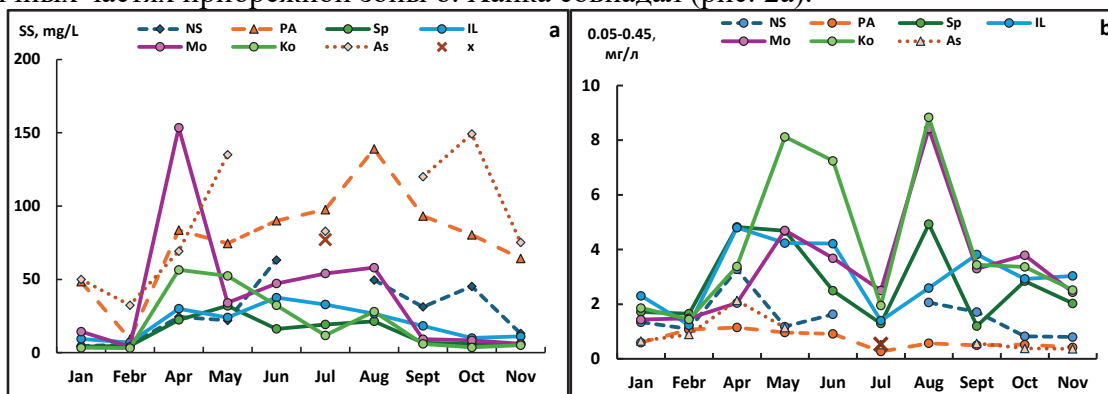


Рис. 2. (а) Сезонное изменение содержания взвеси (мг/л) и (б) Сезонное изменение содержания крупных коллоидов, оцененных по интенсивности ДРС фильтратов, в речных и озерных водах бассейна оз.Ханка.

Содержание крупных коллоидов (0,05-0,45 мкм) в реках бассейна оз. Ханка варьировало в течение года в диапазоне 1.2-8.8 мг/л (рис. 2b). Минимальное содержание крупных коллоидов в реках наблюдается зимой. Весной содержание крупных коллоидов значительно возрастает: в 3-4 раза в апреле для антропогенно нагруженных рек Спасовка и Илистая, и в 4-7 раз в мае в более чистых Мельгуновке и Комиссаровке (рис. 2b). В течение лета содержание крупных коллоидов в реках остается повышенным, но на этом фоне наблюдается резкое

падение в июле практически для всех рек, хотя в августе оно вновь возрастает и достигает максимума в реках Спасовка, Мельгуновка и Комиссаровка. Осенью содержание крупных коллоидов снижается до уровня лишь в 1.5-2 раза превышающего минимальные величины, наблюдаемые зимой подо льдом (рис. 2b).

Содержание крупных коллоидов в водах основной части оз. Ханка значимо (в 1.5-2 раза) меньше, чем во впадающих реках даже зимой подо льдом. В теплое время года содержание крупных коллоидов в озерных водах остается приблизительно на одном невысоком уровне 0.6-1.2 мг/л (рис. 2b). Таким образом, содержание крупных коллоидов в озерных водах низкое и не зависит от общего содержания взвеси.

Характер сезонного изменения содержания взвеси в реках, впадающих в оз. Ханка, типичен для рек южной бореальной природно-климатической зоны, где расположен бассейн озера. Очевиден доминирующий контроль водного режима: минимальное содержание взвеси наблюдается зимой в ледостав, и в октябре-ноябре в период глубокой осенней межени, когда водный сток также минимален. Наблюдаемое при этом содержание взвеси 3-10 мг/л соответствует наиболее чистым рекам РФ и Мира [Meubeck, Ragu, 2012]. В период весеннего половодья содержание взвеси в реках естественно возрастает, при этом рост максимален в реках Мельгуновка и Комиссаровка, дренирующих бассейны с выраженным преобладанием низкогорных лесных ландшафтов на большей части водосборов [2]. В бассейнах рек Илистая и Спасовка подобные ландшафты характерны только для верховьев, а среднее и нижнее течение рек, где проходил отбор проб, представлены заболоченными равнинами. Соответственно, несущая сила потоков здесь в отсутствие сильных паводков невелика, что ведет к невысокому содержанию взвеси 16-38 мг/л в этих реках с апреля по сентябрь, тогда как в реках Мельгуновка и Комиссаровка содержание взвеси летом 2025 г. составляло 28-58 мг/л (рис. 2a).

В самом озере наиболее вероятной причиной повышенного уровня содержания взвеси является практически постоянное ветроволновое взмучивание верхнего слоя донных отложений, что обеспечивается большими размерами водного зеркала (90x120 км) при малой глубине (4-5 м). Доказательством ведущей роли ветрового фактора является обычно наблюдаемое на спутниковых снимках узкая вдольбереговая полоса с пониженной величиной индекса NDWI (рис. 1), который отражает содержание в воде минеральной взвеси. Кроме того, при устойчивом ветре восточных румбов, преобладающих в мае, происходило увеличение высоты волн с удалением от восточного берега, что сопровождалось интенсификацией взмучивания и увеличением индекса NDWI в центральной и западной частях озера (рис. 1).

Сезонная изменчивость содержания крупных коллоидов в реках бассейна оз. Ханка также характеризуется минимальным уровнем зимой и увеличением в теплое время года. Однако, на этом фоне наблюдалось резкое снижение концентрации крупных коллоидов в июле, хотя общий уровень содержания взвеси сохранялся высоким. Наиболее выражено уменьшение крупных коллоидов в июле для рек Комиссаровка и Мельгуновка с преобладанием лесных ландшафтов на водосборах (рис. 2b). Возможно падение концентрации крупных коллоидов в июле отражает различные источники коллоидных и взвешенных частиц, и их различную реакцию на наблюдавшееся снижение водного стока в июле, по сравнению с маем-июнем и августом. В итоге, в реках бассейна оз. Ханка имеет место лишь тенденция зависимости содержания крупных коллоидов от общего количества взвеси для рек Спасовка, Илистая, Комиссаровка, а в р. Мельгуновка связь отсутствует за счет максимального содержания взвеси в весеннее половодье, при котором содержание крупных коллоидов понижено. Это отличает реки бассейна оз. Ханка от Усури и Раздольной для которых наблюдалась значимая корреляция между содержанием крупных коллоидов и содержанием взвеси [4].

Наблюдаемый пониженный уровень содержания крупных коллоидов в водах оз. Ханка и его практическое постоянство в течение года и на акватории озера (рис. 2b) указывает на эффективные механизмы коагуляции и последующей седиментации крупных коллоидов,

приносимых реками, несмотря на близость ионного состава речных и озерных вод. Содержание крупных коллоидов на станции NS в прибрежных водах юго-восточной части оз. Ханка, которая находится под явным влиянием стока р. Спасовка, и демонстрирует сезонную изменчивость промежуточную между характерной для рек и для озера (рис. 2а), подтверждает гипотезу удаления в озере крупных коллоидов, приносимых реками.

Сезонная изменчивость концентрации растворенных и коллоидных (<0.45 мкм) форм Al, Fe (рис. 3а, б) и Ti (не показано) в реках бассейна оз. Ханка однотипна и во многом схожа с характером сезонной изменчивости содержания крупных коллоидов (рис. 2б). Минимум концентрации этих металлов в фильтраатах наблюдается зимой в ледостав и в конце осени. В весеннее половодье их концентрация возрастает в 10-40 раз, но максимума достигает в мае-июне. В июле 2025 г., как и для крупных коллоидов наблюдалось падение концентрации Al, Fe, Ti до уровня весеннего половодья, но в августе их концентрация вновь возросла с последующим устойчивым снижением осенью (рис. 2б и 3а, б).

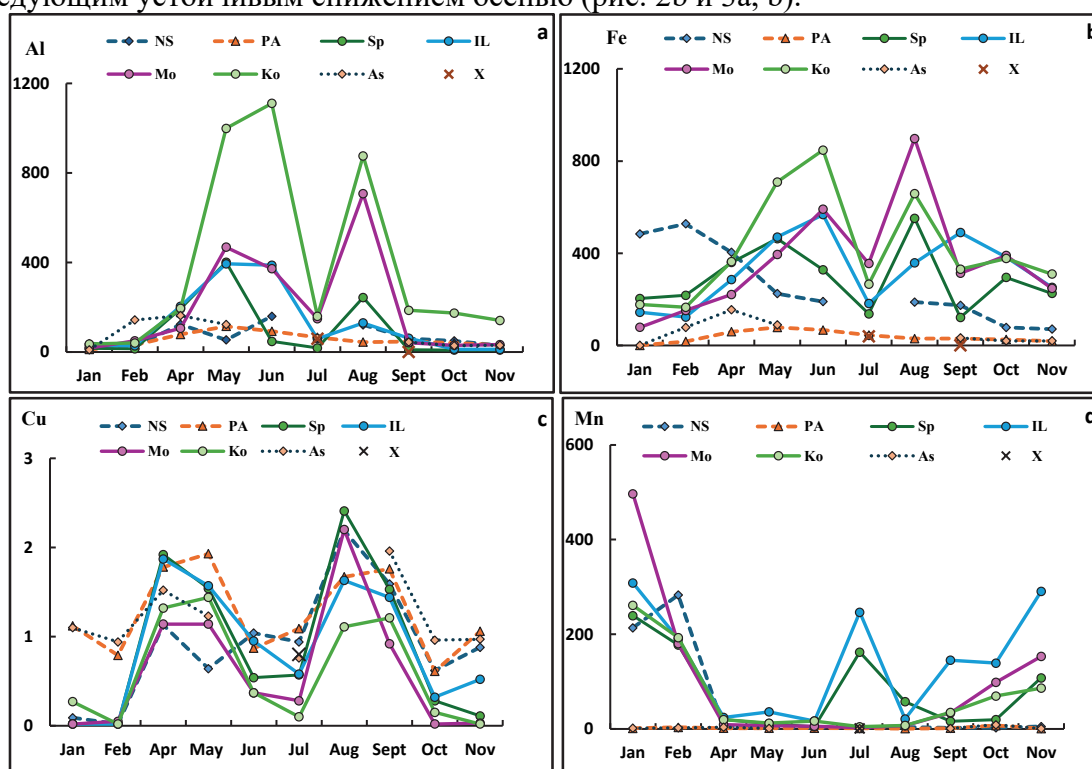


Рис. 3. Сезонное изменение концентрации (мкг/л) Al (а), Fe (б), Cu (с) Mn (д) в фильтраатах рек, впадающих в оз. Ханка и в озерных водах.

Концентрация Al и Ti в озерных водах зимой и осенью достаточно низка и мало отличается от уровня, наблюдаемого во впадающих реках. Однако, летом концентрация растворенных форм этих металлов в озере возрастает не более чем в 3-8 раз, т.е. не столь контрастно как в реках. Для Fe в озерных водах также характерно минимальное содержание зимой и во второй половине осени, но в отличие от Al и Ti, концентрация Fe в это время становится меньше чем в реках (рис. 3б). Летом концентрация Fe в озере повышается в 4-8 раз. Главным отличием от Al и Ti является повышенный уровень концентрации Fe в зимний период в юго-восточной прибрежной зоне оз.Ханка, который демонстрирует тренд снижения в течение года (рис. 3б).

Сезонная изменчивость концентрации Cu в фильтраатах рек бассейна оз. Ханка в общих чертах подобна таковой для Al, Ti, Fe: низкая концентрация 0.1-0.2 мкг/л зимой и во второй половине осени и повышенный на порядок уровень в теплое время года с апреля по сентябрь со временным снижением в июне и июле (рис. 3с).

Сезонные изменения концентрации Mn в фильтрах (рис. 3d) указывают на сочетание ряда биогеохимических процессов и гидрологических условий, контролирующих миграцию и содержание этого металла в речных и озерных водах. Во-первых, зимние максимумы концентрации Mn в речных водах отражают влияние восстановительных условий в аллювиальных и пойменных отложениях, которые обеспечивают поступление в воду ионных растворенных форм Mn^{2+} , что в условиях минимального речного стока и ведет к высокой концентрации растворенного Mn в речных водах. Снижение на порядок концентрации растворенного Mn в речных водах в апреле указывает на контролируемую роль водного режима, поскольку интенсивность восстановительной мобилизации металла по сравнению с зимой, вероятно, не уменьшается. В летний период концентрация растворенного Mn в реках Комиссаровка и Мельгуновка, дренирующих преимущественно лесные ландшафты, продолжает оставаться на уровне не более 10-20 мкг/л. Однако в реках Спасовка и Илистая среднее и нижнее течение которых представлено заболоченными или хозяйственно-освоенными ландшафтами, и, соответственно с более интенсивной восстановительной мобилизацией Mn, его концентрация в июле возрастает до 162-247 мкг/л, чтобы в августе вновь уменьшиться в 3-8 раз (рис. 3d). Учитывая минимальную водность рек в июле, можно предположить, что, как и в апреле, вариации водного режима являются главным фактором, контролирующим концентрацию растворенного Mn в реках, на фоне большей интенсивности восстановительной мобилизации в реках Спасовка и Илистая по сравнению с Комиссаровкой и Мельгуновкой. Осенью на фоне снижения водности рек, концентрация растворенного Mn в них возрастает в соответствии с интенсивностью мобилизации до 86-290 мкг/л. В водах юго-восточного побережья оз. Ханка концентрация растворенного Mn с апреля по ноябрь колеблется в диапазоне 2-5 мкг/л, а в остальной части озера не превышает 1-2 мкг/л. Это указывает на доминирование на акватории озера условий, эффективно удаляющих растворенный Mn в твердую фазу взвеси и в донные отложения.

Заключение

Содержание взвеси и крупных коллоидов в реках бассейна оз. Ханка контролируется водным режимом, а в водах озера взмучиванием донных отложений при ветроволновом воздействии. Уровень содержания крупных коллоидов в озерных водах в 3-10 раз меньше, чем в речных, что указывает на их эффективное удаление, вероятно за счет коагуляции. Концентрация растворенных/коллоидных (<0.45 мкм) форм Fe, Al, Ti и в речных и в озерных водах определяется содержанием крупных коллоидов, и, соответственно, значительно выше в речных водах, особенно летом. Концентрация Mn в речных водах контролируется соотношением его мобилизации в раствор при восстановительных процессах и разбавлением за счет водного стока. В озерных водах доминирует связывание Mn в твердых фазах с минимальной концентрацией в растворе на протяжении всего года.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 25-47-00022 «Трансформация гидрологического режима и её экологическое воздействие на российско-китайскую трансграничную геосистему оз. Ханка в условиях изменения окружающей среды».

Литература

1. Васьковский М.Г. Гидрологический режим озера Ханка. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 175 с.
2. Трансграничное озеро Ханка: современное состояние и перспективы развития. – Владивосток: ФНЦ Биоразнообразие ДВО РАН, 2021. – 291 с.
3. Шулькин В. М. Применение метода динамического рассеяния света для оценки содержания крупно-коллоидных и взвешенных частиц в речных водах // Доклады академии наук. Науки о земле. – 2025. Том 521. – № 4. – С. 67–73.

4. Шулькин В. М., Еловский Е. В. Оценка содержания крупных коллоидов методом динамического рассеивания света при химическом анализе речных вод Дальнего Востока РФ// Водные ресурсы. – 2025. Том 52. – № 4. – С. 78–93.

5. Wu Y., Chen D., Liu Y., Li F., Wang P., Wang R., Shamov V.V., Zhu A.-X., Deng C. Water Quality Changes in the Xingkai (Khanka) Lake, Northeast China, Driven by Climate Change and Human Activities: Insights from Published Data (1990–2020). *Water* 2024, 16, 3080.

6. Yuan, Y.X.; Jiang, M.; Liu, X.T.; Yu, H.X.; Otte, M.L.; Ma, C.X.; Her, Y.G. Environmental variables influencing phytoplankton communities in hydrologically connected aquatic habitats in the Lake Xingkai basin. *Ecol. Indic.* 2018, 91, 1–12.